

Efeito da densidade de corrente no desempenho do elétrodo ferramenta

Júlio Rafael Lopes Ferreira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. José Duarte Marafona



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2017

“Finishing races is important, but racing is more important.”

Dale Earnhardt

Resumo

A eletroerosão é um processo em evolução, com aspetos muito competitivos e peculiares, no entanto, não é um processo ainda totalmente dominado. Por isso, após a apresentação deste processo nas aulas durante o meu percurso académico, e por proposta do Prof. Dr. José Marafona, executou-se um estudo acerca da influência de vários parâmetros, de entre os quais a influência da densidade volumétrica de corrente na performance do processo de fabrico de eletroerosão.

Utilizando métodos estatísticos tais como o Método de Taguchi, a Análise de Variância, o Teste-F e ainda de *softwares* ligados a esta área (e.g. Minitab), foi possível tirar elações com maior precisão e caraterizar a influência de cada fator nas diversas variáveis de resposta que se relacionam com o desempenho deste processo de fabrico.

Aprofundaram-se conhecimentos práticos no que diz respeito à utilização da máquina de eletroerosão detida pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Para além da programação desenvolvida, todo o mecanismo de erosão foi estudado, para que se seleccionassem fatores com elevado grau de interesse.

Effect of current density on the performance of the tool-electrode

Abstract

Electrical Discharge Machining is an evolving process, with very competitive and peculiar aspects, however, it is not a process yet fully mastered. After the presentation of this process in the classes and introduced by José Marafona, PhD, a study was carried out on the influence of several parameters, among them the influence of current volumetric density on the performance of the EDM process.

Using statistical methods such as the Taguchi Method, an Analysis of Variance, the F-Test and related software (eg Minitab), it was possible to get conclusions with greater precision and to characterize the influence of each factor in the several variables that relate to the performance of this manufacturing process.

Practical knowledge regarding the use of the electroerosion machine owned by the Faculty of Engineering of the University of Porto was deepened. In addition, the programming of the EDM machine and the entire mechanism of erosion was studied in order to select factors with a high degree of interest.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor José Duarte Ribeiro Marafona, pelo acompanhamento, dedicação e partilha de conhecimentos e competências ao longo da presente dissertação, assim como pelas permanentes críticas e sugestões que permitiram a evolução deste trabalho.

Ao Professor Doutor Armando Leitão pela disponibilidade e toda a ajuda prestada na elaboração deste trabalho.

Aos Srs. Pedro Falcão, André Alves e José Almeida, técnicos de laboratório, e à Emilia Soares, assistente técnica do Departamento de Engenharia Mecânica pela permanente disponibilidade, apoio e conhecimentos transmitidos durante a evolução do trabalho.

Aos meus Pais e à minha Irmã pelo grande contributo e incansável apoio nesta fase final da minha formação académica.

Ao Ruben e à Andreia por todo o incentivo e apoio anímico para a conclusão do presente documento.

A todos os restantes amigos e colegas do curso de Engenharia Mecânica, pelo apoio e disponibilidade demonstrada.

A todos, um enorme e sincero Obrigado!

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Apresentação da Instituição	1
1.3	Objetivos do projeto	2
1.4	Método seguido no projeto.....	2
1.5	Estrutura da dissertação.....	2
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Introdução à Eletroerosão.....	5
2.2	Processos de Eletroerosão	6
2.2.1	Eletroerosão por Fio	6
2.2.2	Eletroerosão por Penetração	7
2.2.2.1	Mecanismo do Processo <i>EDM Die Sinking</i>	8
2.2.2.2	Parâmetros do Processo	12
2.2.3	Outros métodos <i>EDM</i>	14
2.3	História da Eletroerosão	16
2.4	Capacidades do Processo	16
2.5	Seleção de Materiais da Ferramenta.....	18
2.5.1	Materiais metálicos.....	18
2.5.1.1	Desgaste Teórico – materiais metálicos	19
2.5.2	Grafite.....	19
2.6	Materiais maquinados em EDM.....	20
2.7	Superfície Maquinada – Modificações Estruturais (camada branca, HAZ, material base)	22
2.8	Método Taguchi	24
2.8.1	Definição	24
2.8.2	Matriz Ortogonal L_{18}	25
2.8.3	Etapas de um Design de Experiências	26
2.8.4	Análise de respostas	26
3	Planeamento do estudo do efeito da densidade de corrente	27
3.1	Apresentação do problema	27
3.2	Preparação	27
3.2.1	Máquina EDM <i>Die Sinking</i> – Agie Compact 3	27
3.2.2	Eletrodo Ferramenta	29
3.2.3	<i>Workpiece</i>	29

3.2.4	Medição do Peso	30
3.3	Seleção de Fatores	30
3.3.1	Volume	30
3.3.2	Forma	31
3.3.3	Área.....	32
3.3.4	Outros Fatores.....	32
3.3.5	Fatores constantes	33
3.4	Guia de Ensaios	34
3.5	Variáveis de Resposta.....	35
3.5.1	Material Removal Rate	35
3.5.2	Tool Wear	35
3.5.3	Rugosidade	35
4	Análise de Resultados	37
4.1	MRR – <i>Material Removal Rate</i>	41
4.1.1	Gráfico de Efeitos Principais	41
4.1.2	Análise de Variância.....	42
4.1.3	Análise de Variância considerando apenas os fatores significativos	42
4.1.4	Coeficientes do Modelo de Regressão Linear	43
4.1.5	Níveis ótimos	43
4.2	TW – <i>Tool Wear Rate</i>	45
4.2.1	Gráfico de Efeitos Principais	45
4.2.2	Análise de Variância.....	46
4.2.3	Análise de Variância considerando apenas os fatores significativos	46
4.2.4	Coeficientes do Modelo de Regressão Linear	47
4.2.5	Níveis ótimos	47
4.3	TWR – <i>Tool Wear Ratio</i>	48
4.3.1	Gráfico de Efeitos Principais	48
4.3.2	Análise de Variância.....	49
4.4	Rugosidade	50
4.4.1	Gráfico de Efeitos Principais	50
4.4.2	Análise de Variância.....	51
4.4.3	Análise de Variância considerando apenas os fatores significativos	51
4.4.4	Coeficientes do Modelo de Regressão Linear	52
4.4.5	Níveis ótimos	52
4.5	Validação experimental dos níveis ótimos	53
4.5.1	Níveis ótimos – Resultados previstos e Ensaios experimentais.....	53
4.5.2	Confirmação de ensaios experimentais.....	54

5	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Trabalhos Futuros.....	61
	Referências	63
ANEXO A:	Codificação de Parâmetros e <i>Design</i> de experiências L ₁₈	68
ANEXO B:	Projeto de eletrodos	69
ANEXO C:	Tratamento dados de variáveis de respostas Excel.....	78
ANEXO D:	Tempos de ensaio	79
ANEXO E:	Peso inicial peça	80
ANEXO F:	Peso final peça.....	81
ANEXO G:	Peso inicial eletrodo	82
ANEXO H:	Peso final eletrodo	83
ANEXO I:	Programação Máquina Agie Compact 3.....	84

Siglas

DOE – *Design of Experiments* – Projeto de Experiências

EDM – *Electric Discharge Machining* – Eletroerosão

MRR – *Material Removal Rate* – Taxa de remoção de metal [$\text{mm}^3.\text{min}^{-1}$]

TWR – *Tool Wear Ratio* – Razão de desgaste [%]

TWW – *Tool Wear Weight* – Variação de massa da ferramenta [g]

TW – *Tool Wear Rate* – Taxa de desgaste do eletrodo [$\text{mm}^3.\text{min}^{-1}$]

WRW – *Workpiece removed weight* – Variação de massa da peça a maquinar [g]

Índice de Figuras

Figura 1 – Eletroerosão por Fio	5
Figura 2 – Eletroerosão por Penetração	5
Figura 3 – Esquema Eletroerosão por Fio	6
Figura 4 – Esquema de uma máquina de EDM por penetração	7
Figura 5 – Gap lateral e frontal.....	8
Figura 6 – Sucessão de descargas elétricas – Erosão por EDM Die Sinking.....	9
Figura 7 – Sequência de uma descarga elétrica – Fases A, B e C	9
Figura 8 - Sequência de uma descarga elétrica – Fases D, E e F	10
Figura 9 - Sequência de uma descarga elétrica – Fase G, H e I	11
Figura 10 – Efeito do parâmetro: Corrente.....	12
Figura 11 – Efeito do parâmetro: Frequência do Pulso	13
Figura 12 – Eletrodo utilizado em Dry EDM milling	14
Figura 13 – Princípio de Dry EDM	14
Figura 14 – Mapa mundi executado com 751 micro furos de 85 µm de diâmetro através de Micro EDM Ultrasonic Vibration	15
Figura 15 – Vibração ultrassônica aplicada.....	15
Figura 16 – Diversos tipos de lavagem existentes.....	15
Figura 17 – Esquema elétrico Resistência-Condensador	16
Figura 18 – Componentes cirúrgicos maquinados em EDM.....	17
Figura 19 - Corte de precisão com fio de 0,15 mm de diâmetro	17
Figura 20 – Componentes de um instrumento de medição de precisão	17
Figura 21 – Diversas peças complexas obtidas por EDM	17
Figura 22 – Molde em NAK80 para injeção de plástico	20
Figura 23 – Camadas características após EDM	22

Figura 24 – Esquema representativo do sistema	24
Figura 25 – Máquina AGIE Compact 3	27
Figura 26 – Eletrodo utilizado no estudo	29
Figura 27 – Peça utilizada nos ensaios.....	29
Figura 28 – Peça e eletrodos prontos	29
Figura 29 – Balança de precisão Mettler	30
Figura 30 – Volumes do Eletrodo	30
Figura 31 – Distribuição do Campo Magnético.....	31
Figura 32 – Eletrodo Circular	31
Figura 33 – Eletrodo Quadrangular	31
Figura 34 – Exemplo de uma placa com escalas VDI	36
Figura 35 – Software utilizado na medição de rugosidade	36
Figura 36 – Rugosímetro utilizado.....	36
Figura 37 - Variação de TW em cada ensaio	38
Figura 38 - Variação de MRR em cada ensaio	38
Figura 39 - Variação de Rugosidade média Aritmética em cada ensaio	38
Figura 40 - Variação de TWR em cada ensaio	38
Figura 41 – Peça maquinada e eletrodo número 10	39
Figura 42 – Gráfico de efeitos principais MRR.....	41
Figura 43 - Níveis ótimos obtidos em MiniTab.....	43
Figura 44 – Gráfico de efeitos principais TW.....	45
Figura 45 - Níveis ótimos para TW	47
Figura 46 – Gráfico de efeitos principais TWR.....	48
Figura 47 – Gráfico de efeitos principais Ra	50
Figura 48 – Níveis ótimos obtidos em MiniTab	52
Figura 49 – Evolução do erro relativo em cada ensaio para a resposta MRR	55
Figura 50 – Evolução do erro relativo em cada ensaio para a resposta TW	57

Figura 51 – Evolução do erro relativo de cada ensaio para a resposta Rugosidade média aritmética	58
--	----

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros e codificação – Método de Taguchi.....	32
Tabela 2 – Parâmetros Constantes.....	33
Tabela 3 – Planejamento dos Ensaios Experimentais	34
Tabela 4 – Resultados obtidos após conclusão dos ensaios: MRR e TW	37
Tabela 5 - Resultados obtidos após conclusão dos ensaios – TWR e Ra.....	38
Tabela 6 – ANOVA para MRR	42
Tabela 7 – ANOVA para MRR após eliminação de fatores menos significantes.....	42
Tabela 8 – Níveis ótimos de MRR e MRR Máximo	44
Tabela 9 – ANOVA para TW.....	46
Tabela 10 – ANOVA para TW após eliminação de fatores menos significantes.....	46
Tabela 11 – Níveis ótimos TW e TW mínimo	47
Tabela 12 – ANOVA para TWR.....	49
Tabela 13 – ANOVA para Rugosidade	51
Tabela 14 – ANOVA para Rugosidade após eliminação de fatores menos significativos.....	51
Tabela 15 – Níveis ótimos de Rugosidade e Rugosidade mínima	52
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de confirmação.....	53
Tabela 17 – Comparação entre o valor previsto pelo modelo e o valor obtido experimentalmente	53
Tabela 18 – MRR previsto e obtido experimentalmente	54
Tabela 19 – TW previsto e obtido experimentalmente.....	56
Tabela 20 - Ra prevista e obtida experimentalmente	57

1 Introdução

Sendo considerado um processo de fabrico não-convencional, a Eletroerosão mostrou-se um tema apelativo e com imensa margem de progressão. Desenvolvido desde cerca de 1950, é um processo que ainda hoje em dia não é facilmente dominado, e impõe pesquisa e investigação acerca dos vários parâmetros que compõem o processo, materiais envolvidos, etc.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Esta dissertação surge no contexto de investigação do Professor Doutor José Duarte Ribeiro Marafona na área de Eletroerosão por Penetração. De entre os diversos trabalhos e artigos científicos publicados, foi posto em consideração que o valor de corrente por unidade de volume do eléctrodo ferramenta fosse um parâmetro influenciável no que diz respeito ao desempenho do processo. O desafio foi aceite, uma vez que surgiu a hipótese de ser colocado em tema de dissertação.

1.2 Apresentação da Instituição

Toda a logística relacionada com os ensaios efetuados, pesquisa e investigação foi facultada pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), com o apoio do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec) – Secção de Materiais e Processos Tecnológicos (SMPT).



1.3 Objetivos do projeto

Com esta dissertação pretende-se estudar a influência de vários parâmetros no processo de Eletroerosão, para além da compreensão dos vários fenómenos associados ao processo de fabrico e ainda a utilização de ferramentas estatísticas, nomeadamente a análise de variância, design de experiências e o Método de Taguchi.

1.4 Método seguido no projeto

Ao longo deste trabalho, foi utilizado um planeamento que se pode descrever através do seguinte cronograma.

Etapas	Descrição das etapas	fev		mar		abr		mai		jun	
		1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª
1	Estado de Arte										
2	Projeto e Dimensionamento de Eletrodos										
3	Desenho estatístico de experiências										
4	Ensaaios Experimentais										
5	Discussão e análise de resultados										
6	Validação Experimental										

1.5 Estrutura da dissertação

O presente documento encontra-se organizado em cinco capítulos principais:

Capítulo 1: Introdução

Com este capítulo pretende-se executar uma primeira contextualização do leitor à temática abordada neste documento e apresentar a instituição que forneceu as condições necessárias à execução deste trabalho. Dá-se, também, a conhecer os objetivos, método e estrutura do projeto desenvolvido.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Nesta seção, exibe-se uma pesquisa exaustiva acerca do processo de maquinagem em estudo, a Eletroerosão por Penetração. Apresentam-se diversas variantes do processo, o seu mecanismo e os parâmetros envolvidos. Também se faz uma breve referência acerca da história do processo, mostra-se algumas capacidades e operações possíveis de realizar e ainda quais os

materiais envolvidos, sua seleção e as modificações metalúrgicas. Por fim, apresenta-se o Método de Taguchi.

Capítulo 3: Planeamento do estudo do efeito da densidade de Corrente

Nesta secção, pretende-se apresentar com detalhe o problema, os fatores envolvidos no estudo, todo o suporte físico incluindo a máquina envolvida e seus eléctrodos, e ainda as variáveis de saída para análise posterior da performance da operação de maquinagem.

Capítulo 4: Análise de resultados

O capítulo 4 consiste na análise de resultados obtidos após a execução de todos os ensaios experimentais, tecendo algumas considerações sobre os mesmos. Também se apresenta a validação experimental dos valores previstos através do modelo gerado.

Capítulo 5: Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas todas as conclusões obtidas ao longo deste estudo e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução à Eletroerosão

Eletroerosão, também designado por *Electrical Discharge Machining* ou pela sigla EDM, é um dos processos não-convencionais mais utilizados para remoção de material (Sommer 2005).

Consiste num processo subtrativo que utiliza energia térmica para a remoção de material de peças com elevada condutividade elétrica, sem estar limitado pela dureza da peça a maquinar. É, por isso, um processo muito utilizado no fabrico de matrizes e moldes metálicos, componentes para a indústria automóvel e aeroespacial e até componentes cirúrgicos (Ho e Newman 2003).

Existem diversos métodos de maquinagem por EDM, sendo os mais comuns a:

- Eletroerosão por Fio;
- Eletroerosão por Penetração.

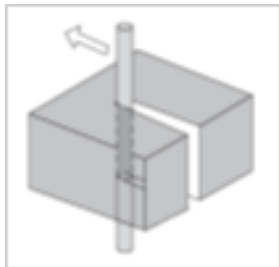


Figura 1 – Eletroerosão por Fio

Fonte: Sapienza - Università di Roma

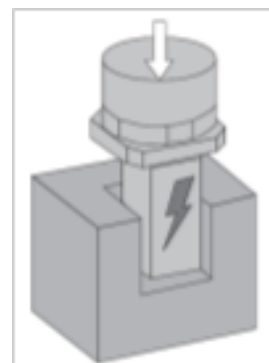


Figura 2 – Eletroerosão por Penetração

Fonte: Sapienza - Università di Roma

Em ambos os casos é aplicada uma corrente em alta frequência de corrente contínua DC (impulsos com elevada frequência), que através de um fio ou um elétrodo, fundem e vaporizam o material da peça a maquinar.

Este processo é normalmente utilizado quando o material a maquinar apresenta dureza elevada ou a geometria e o detalhe necessários não sejam facilmente exequíveis por métodos de maquinagem convencionais (Guitrau 1997).

2.2 Processos de Eletroerosão

2.2.1 Eletroerosão por Fio

A Eletroerosão por fio é um processo avançado de remoção de material através de um fio, também designado por elétrodo, que é normalmente constituído por cobre, latão ou ligas à base de molibdénio. O elétrodo é normalmente carregado negativamente, sendo considerado o Cátodo, e a peça a maquinar é carregada positivamente, o Ânodo.

Em comparação com o processo de Eletroerosão por Penetração, a erosão por fio não permite um desempenho da mesma ordem, uma vez que a Taxa de Remoção de Material MRR é menor no caso do corte por fio. A principal causa é o facto de os fios permitirem apenas 2 a 3 amperes de corrente, pois com maior intensidade existe a possibilidade dos fios quebrarem.

Existe também entre o fio e a peça a maquinar um fluido dielétrico, normalmente água desionizada (Marafona 2016).

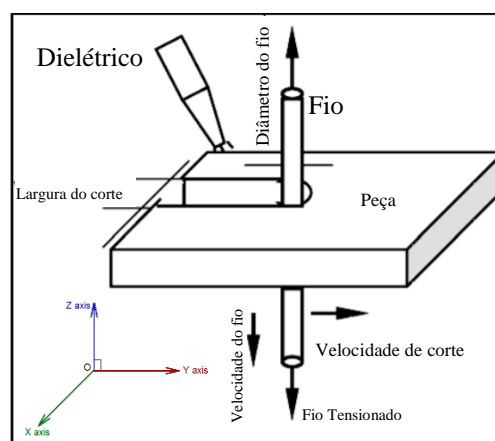


Figura 3 – Esquema Eletroerosão por Fio

Fonte: Srivastava *et al.*

As aplicações deste processo são cortes em contorno no plano X-Y, derivado ao movimento do fio que é no eixo Z.

2.2.2 Eletroerosão por Penetração

O conceito de eletroerosão por penetração, também designado *Vertical Machine* ou *EDM Die Sinking*, tem origem no facto do eléctrodo ser montado e utilizado apenas no eixo vertical “Z” e por ser um processo que ocorre submerso num fluido dielétrico, normalmente um óleo (Guitrau 1997).

A figura seguinte ilustra esquematicamente os elementos de uma máquina de eletroerosão por penetração.

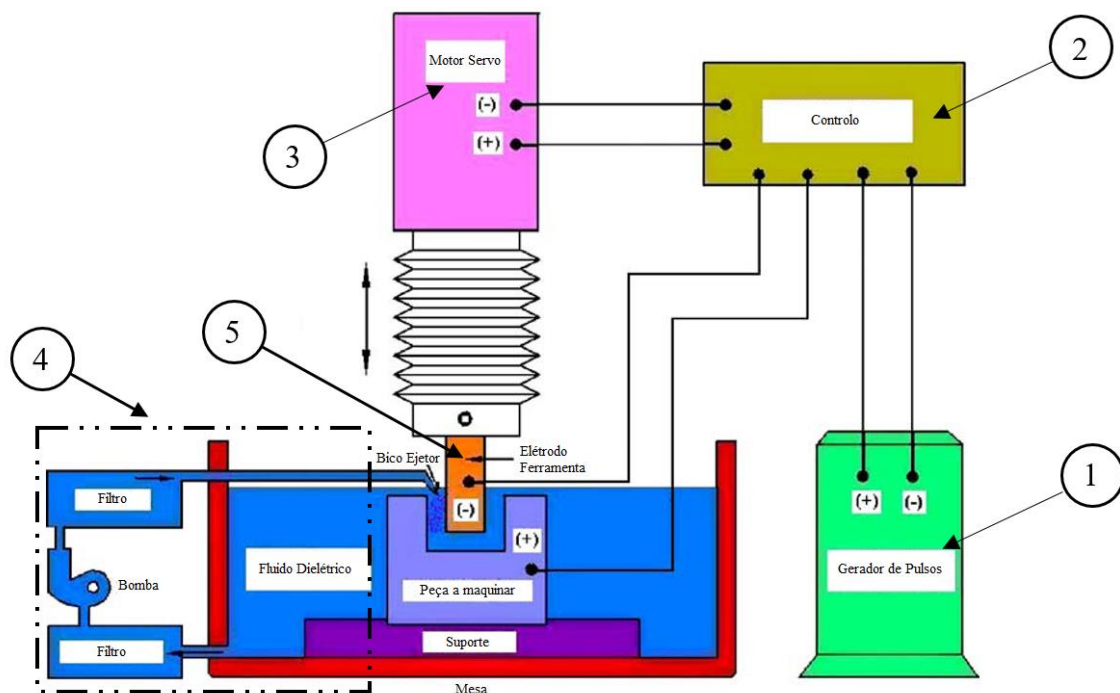


Figura 4 – Esquema de uma máquina de EDM por penetração

Fonte: Sohani *et al.*

Identificam-se como principais componentes:

- 1 – Gerador de impulsos;
- 2 – Sistema de Controlo/Interface;
- 3 – Sistema de Movimentação do eléctrodo;
- 4 – Unidade de dielétrico (Sistema de bombagem, filtragem e controlo de temperatura);
- 5 – Eléctrodo e peça a maquinar (Sohani et al. 2009)

Como se pode evidenciar na figura 4, o movimento do eletrodo pode ser controlado por servomecanismos que conferem elevada precisão. O eletrodo encontra-se normalmente imerso num fluido dielétrico. Este fluido tem características isolantes, cujo objetivo é confinar a descarga às zonas desejadas (Guitrau 1997).

Note-se que neste processo o contacto entre eletrodo e peça a maquinar nunca pode existir, sob pena da erosão ser descontrolada e os resultados obtidos serem indesejados. O eletrodo é posicionado muito perto da peça, a uma distância denominada por *gap*. Nesta zona, as temperaturas são da ordem dos 8000 a 12000 °C (Knight 1989).

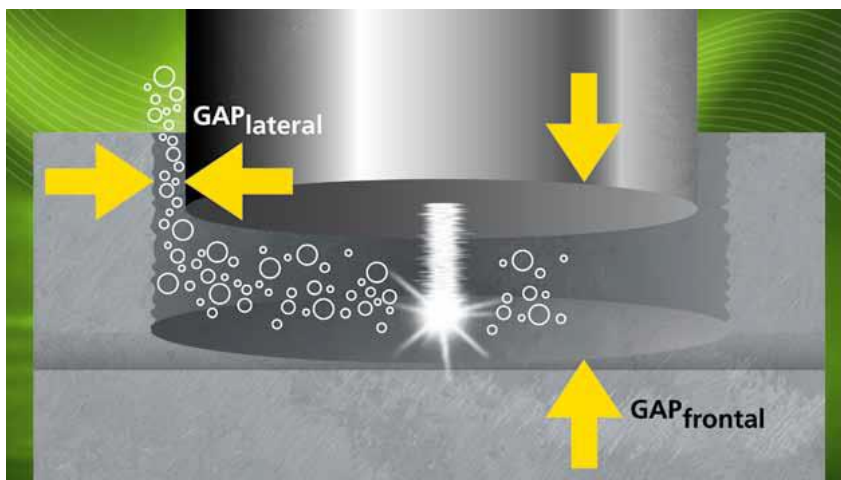


Figura 5 – *Gap* lateral e frontal

Fonte: Oelheld.

2.2.2.1 Mecanismo do Processo *EDM Die Sinking*

De uma forma geral, a EDM consiste na erosão através de descargas elétricas. Como analisado anteriormente, o eletrodo é posicionado a uma distância mínima da peça a trabalhar, *gap*, não permitindo contato, mas sim uma libertação de descargas elétricas nas zonas desejadas.

Existe uma fonte D.C. que provoca uma diferença de potencial entre as duas peças. Aquando da sua aproximação, não existe corrente devido ao fluido dielétrico atuar como isolante.

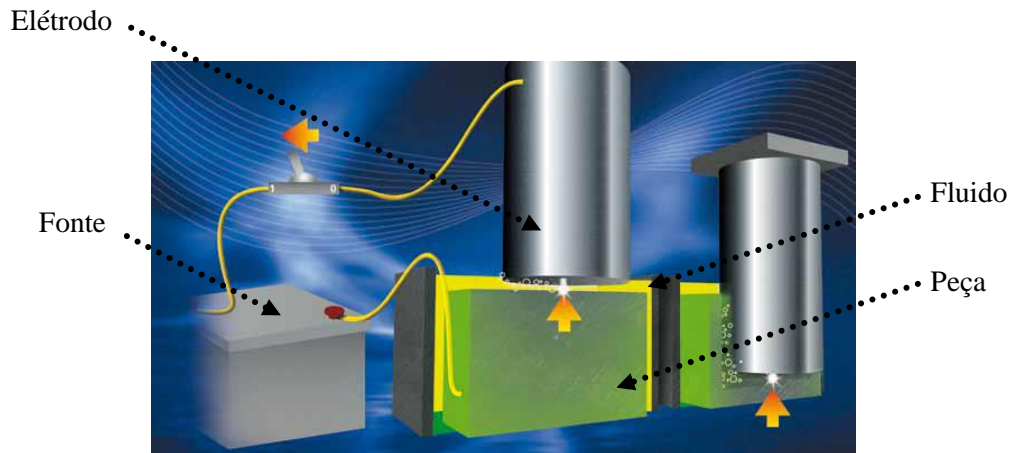


Figura 6 – Sucessão de descargas elétricas – Erosão por EDM Die Sinking Fonte: Oelheld.

No entanto, se a distância entre o eletrodo e a peça for reduzida, existirão condições que permitirão a libertação de uma descarga, que ocorrerá devido à resistência do fluido dielétrico não ser suficiente. Durante a descarga, a intensidade de corrente aumentará e a diferença de potencial diminuirá. Neste exato momento do processo, a descarga é convertida em calor e a superfície do material será severamente aquecida na área do canal de descarga elétrica (Oelheld 2017).

De seguida, a corrente será interrompida e o canal previamente formado colapsará. Consequentemente, o metal fundido evaporará de forma explosiva e formar-se-ão crateras de dimensões muito reduzidas. Com a sucessão repetitiva de descargas, existirá a formação contínua de novas crateras e a superfície da peça será constantemente erodida.

Podemos observar esquematicamente o mecanismo e a forma como a intensidade de corrente e diferença de potencial se relacionam, através das figuras seguintes. Na figura 7, observa-se a primeira fase da sequência da descarga elétrica.

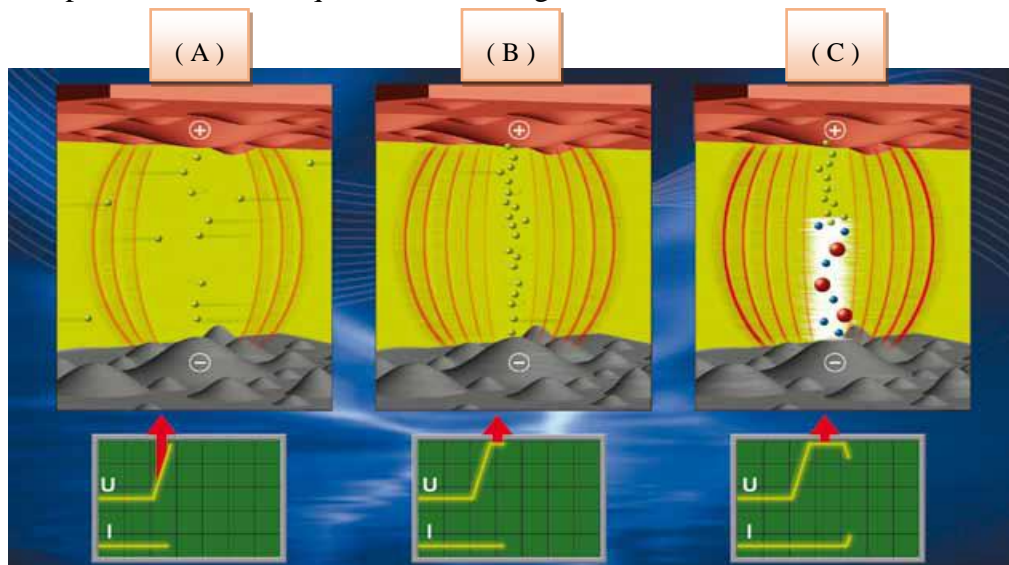


Figura 7 – Sequência de uma descarga elétrica – Fases A, B e C

Fonte: Oelheld.

A fase (A) designa-se por *Open-gap voltage*, e descreve o momento em que o eletrodo se está a aproximar da peça. O gráfico indica que a diferença de potencial é elevada e que não existe nível de corrente.

Em (B), evidencia-se um campo eletromagnético mais denso e criado entre as duas peças. O fluido dielétrico é polarizado e a sua resistência elétrica diminui. Os níveis de tensão estabilizam e os de corrente mantêm-se inalterados.

A fase *On-Time* começa em (C), devido à distância eletrodo-peça ter diminuído a um nível que permite a libertação da descarga elétrica, gerando corrente que vaporiza o metal da peça. Existe um aumento da intensidade de corrente e uma diminuição da diferença de potencial.

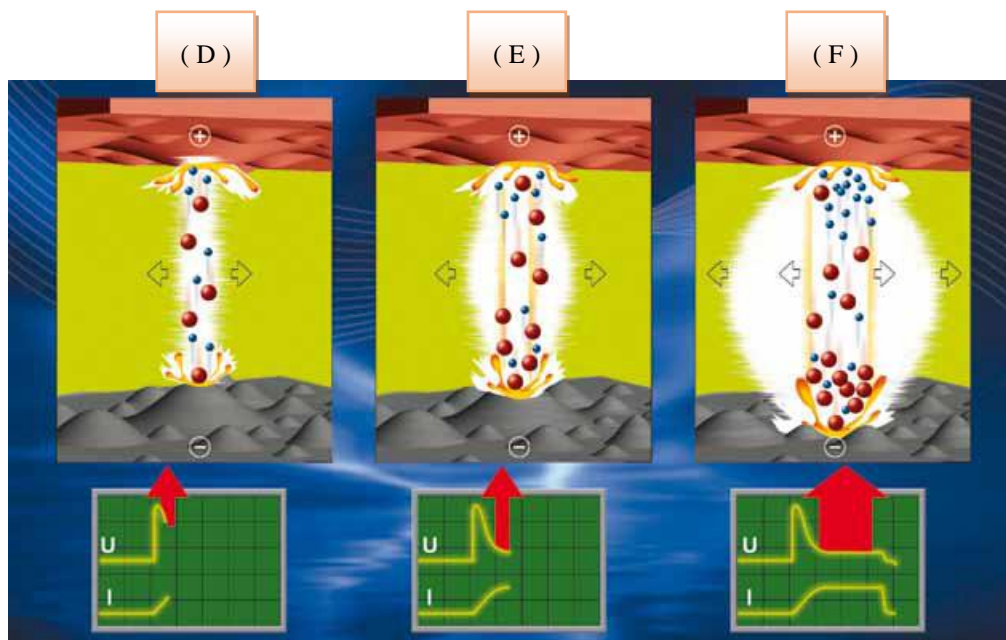


Figura 8 - Sequência de uma descarga elétrica – Fases D, E e F Fonte: Oelheld.

Podemos observar visivelmente que em (D) a descarga elétrica forma uma zona de plasma quente e de gases. Portanto, a temperatura e pressão irão subir de forma drástica, provocando a vaporização do metal. Evidencia-se a troca de partículas entre o eletrodo positivo e a peça negativa e vice-versa, sendo que a corrente aumentará até um nível máximo.

Em (E), continua a existir um aumento da bolha de gases gerados, temperatura e pressão, sendo que num determinado momento se fundirá e vaporizará metal e existirá contaminação do fluido envolvente.

Na fase (F), a diferença de potencial e intensidade de corrente devem estabilizar, uma vez que existe elevada contaminação do fluido dielétrico. É necessário, neste momento, parar a

descarga e renovar o fluido envolvente, caso contrário provocará um arco D.C. com instabilidade na erosão.

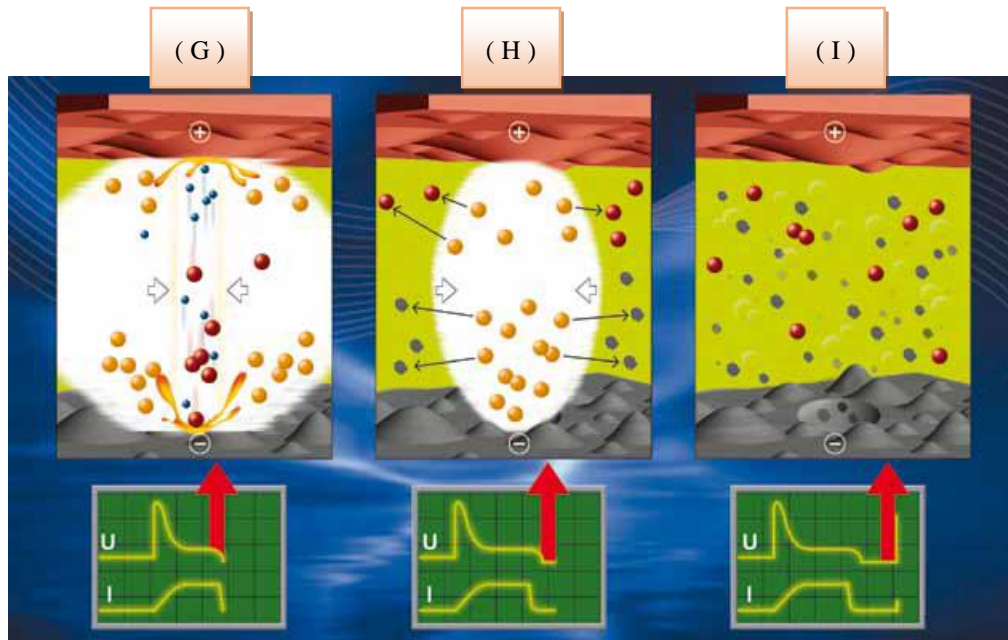


Figura 9 - Sequência de uma descarga elétrica – Fase G, H e I

Fonte: Oelheld.

Por fim, a última sequência começa pela fase *Off-Time* (G). A fonte é desligada e a corrente tende para o valor nulo. O número de partículas carregadas diminui rapidamente, enquanto que a bolha de gás e o canal de plasma colapsa, provocando uma diminuição de temperatura e de pressão.

Na fase (H) verifica-se a continuação da fase (G), existindo uma dispersão do fluido dielétrico contaminado. Esta dispersão pode ser natural ou forçada, como por exemplo utilizando um jato direcionado.

Por fim, em (I) a superfície erodida é revelada e o fluido dielétrico renovado para nova ionização, permitindo uma repetição do ciclo.

2.2.2.2 Parâmetros do Processo

Pode-se avaliar o desempenho deste processo através da taxa de remoção de material da peça a maquinar e a taxa de remoção de material do eletrodo, acabamento superficial (e.g. rugosidade), entre outros.

De entre os diversos parâmetros existentes, os de origem elétrica têm apresentado maior influência no resultado final.

➤ Corrente

A corrente é um exemplo de compreensão simples, pois à medida que a sua intensidade é aumentada, cada descarga remove uma quantidade maior de metal, o que implica um aumento na taxa de remoção de material da peça a maquinar. Também com a diferença de potencial se obtêm resultados semelhantes (Tsai e Lu 2007).

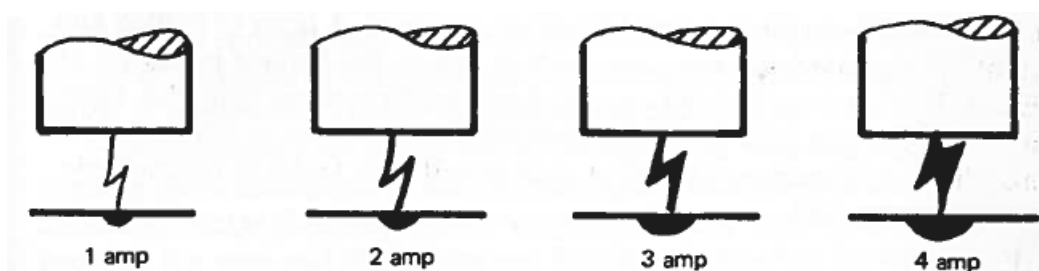


Figura 10 – Efeito do parâmetro: Corrente Fonte: The EDM Handbook

Para efeitos de dimensionamento do valor para a corrente, existe a “Regra do Polegar” que determina que a corrente máxima por polegada quadrada é 65 Amper. Na seguinte equação, a área de superfície é dada por centímetros quadrados (Guitrau 1997).

$$\text{Corrente Máxima} = 65 \times 6,45 \times \text{Área de superfície} \quad [\text{Amper}] \quad (1)$$

➤ Frequência, ON Time e OFF Time

A frequência do pulso é definida pelo número de ciclos por segundo e a sua variação tem permitido a obtenção de resultados de maior qualidade no que diz respeito ao acabamento, nomeadamente a rugosidade superficial. Esta melhoria prende-se pelo facto de a energia depositada ser distribuída por mais ações erosivas e resultar em mais crateras, mas de menor dimensão.

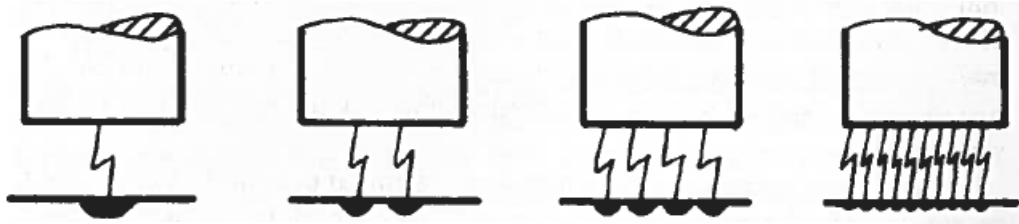


Figura 11 – Efeito do parâmetro: Frequência do Pulso Fonte: The EDM Handbook

Podemos decompor um ciclo em duas fases distintas: *On-Time* e *Off-Time*. O primeiro configura todo o tempo de trabalho erosivo e o segundo contempla o tempo restante de um ciclo na EDM. Cada ciclo é, portanto, caracterizado por uma fase de erosão ativa através da libertação de uma descarga e outra fase de desionização e renovação do fluido dielétrico envolvente. A ordem de grandeza do tempo de cada fase é expressa em microssegundos.

Uma forma de medir a eficiência do processo passa pelo cálculo do *Duty Cycle*, cujo valor depende do tempo de cada uma das fases de um ciclo na EDM.

$$Duty\ Cycle = \frac{On\ Time}{Total\ Cycle\ Time} = \frac{On\ Time}{On\ Time + Off\ Time} * 100\ [\%] \quad (2)$$

➤ Polaridade

A polaridade do eléctrodo é um parâmetro com relevância. Normalmente, são utilizados eléctrodos carregados positivamente de modo a minimizar o desgaste do mesmo. Este facto deve-se à libertação da descarga eléctrica começar no eléctrodo e atingir a peça em trabalho, concentrando a energia térmica na peça que a recebe.

2.2.3 Outros métodos EDM

Para além dos métodos anteriores, apresentam-se outros processos subtrativos menos comuns, relacionados com a eletroerosão:

- *Dry EDM milling*;
- *EDM Ultrasonic Vibration*.

Note-se que existem outros métodos, e existirão certamente novos desenvolvimentos no futuro, sendo que todos eles partilham o mesmo princípio de base: maquinagem através de descargas elétricas (Mohd Abbas, Solomon, e Fuad Bahari 2007).

Em *Dry EDM milling* é utilizado um eletrodo rotativo, que contém um canal central para injeção de oxigénio, sendo que a rotação confere maior precisão durante o processo de corte e a injeção de gás terá como objetivo a oxidação, para se obter maiores taxas de remoção de material e menor desgaste do eletrodo. É um processo que dispensa o banho de óleo (Yu, Jun, e Masanori 2004).

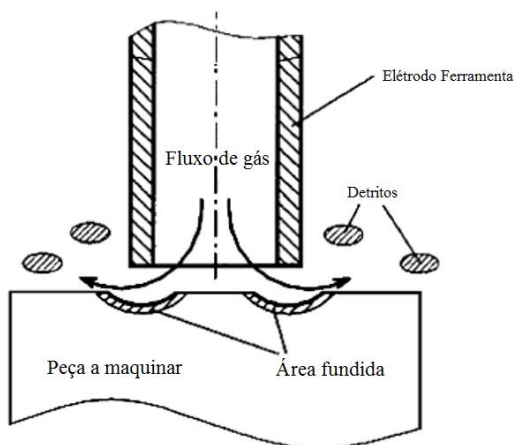


Figura 13 – Princípio de *Dry EDM*
Fonte: Mohd Abbas *et al.*

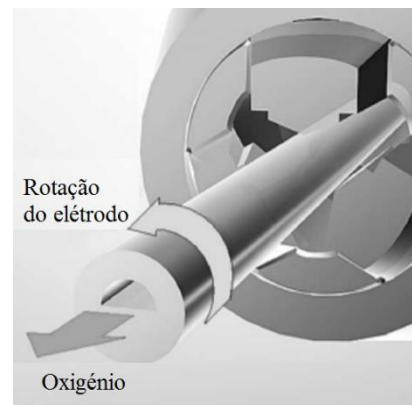


Figura 12 – Eletrodo utilizado em *Dry EDM milling*
Fonte: ZhanBo *et al.*

A técnica de *EDM Ultrasonic Vibration* consiste na aplicação de uma vibração, por exemplo, na peça a maquinar, e é aplicada principalmente para operações na ordem dos microns.

Esta configuração permite uma lavagem eficaz dos detritos libertados pela ação erosiva da descarga eléctrica. Devido à ordem de grandeza dos furos, a lavagem convencional apresentaria fraturas do eléctrodo, mau acabamento, entre outros defeitos. (Schubert et al. 2013)

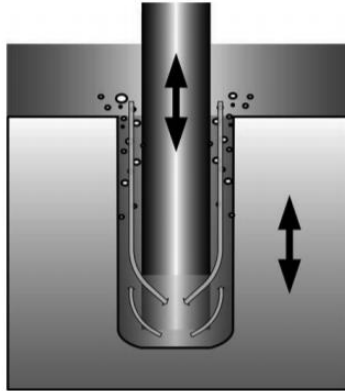


Figura 15 – Vibração ultrassónica aplicada
Fonte: Shaaz Abulais

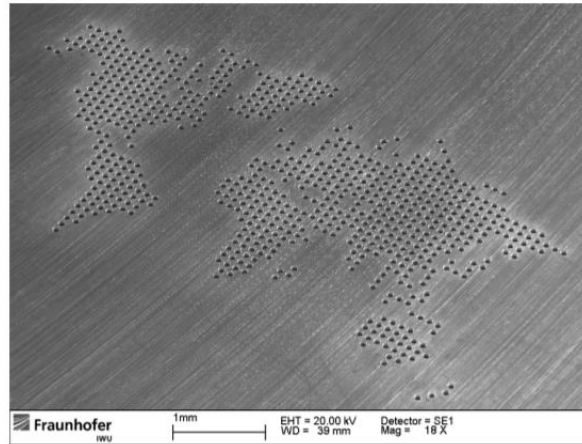
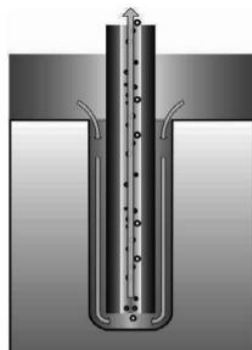


Figura 14 – Mapa *mundi* executado com 751 micro furos de 85 μ m de diâmetro através de Micro EDM *Ultrasonic Vibration*
Fonte: Schubert *et al.*



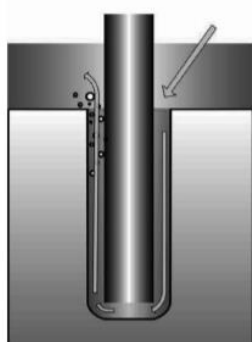
Lavagem por sucção



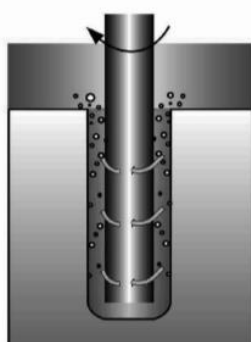
Lavagem interior forçada



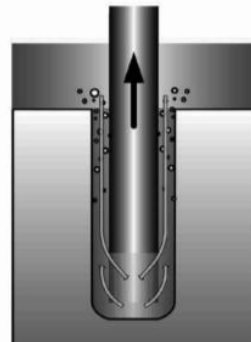
Lavagem combinada



Lavagem jato externo



Lavagem por rotação



Lavagem por movimento vertical

Figura 16 – Diversos tipos de lavagem existentes
Fonte: Schubert *et al.*

2.3 História da Eletroerosão

O princípio básico que caracteriza o processo de Eletroerosão consiste na remoção de material através de descargas elétricas. Esta ideia foi introduzida pela primeira vez pelo químico inglês Joseph Priestly, em 1770 (Ho e Newman 2003).

No entanto, apenas em 1943 dois cientistas russos, B. R. Lazarenko e N. I. Lazarenko, desenvolveram este princípio de forma controlada. O mecanismo utilizado para a geração de impulsos foi o Resistência-Condensador, que serviu de ponto de partida para o desenvolvimento da EDM (Yilbas 2014).

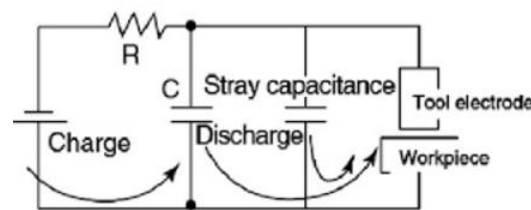


Figura 17 – Esquema elétrico Resistência-Condensador

Fonte: Comprehensive Materials Processing

Com o avanço tecnológico, foi possível adicionar o controlo numérico computadorizado (CNC) ao processo de EDM. O marco situa-se ao longo da década de 1980 e representou um enorme avanço a nível de eficiência e precisão das operações de maquinagem.

2.4 Capacidades do Processo

Uma das principais características associadas à eletroerosão é o facto de se maquinar qualquer peça com condutividade elétrica, sem existirem limitações devido à dureza do material a maquinar. É possível ainda obter acabamento superficial de elevado detalhe e cortes com elevada precisão.

Apresentam-se, a seguir, diversos exemplos de operações e peças que se podem obter na maquinagem por EDM.



Figura 19 - Corte de precisão com fio de 0,15 mm de diâmetro
Fonte: XACT EDM

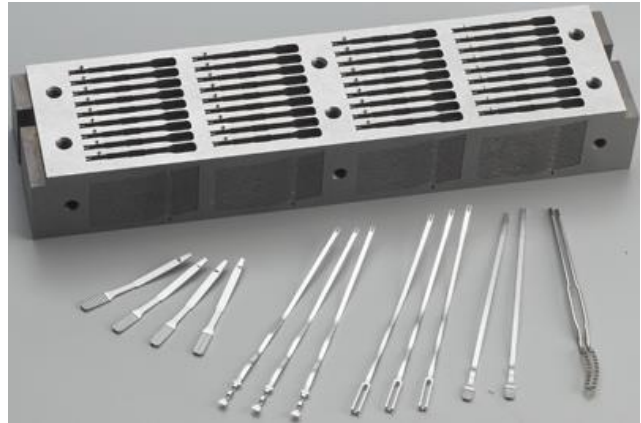


Figura 18 – Componentes cirúrgicos maquinados em EDM
Fonte: XACT EDM

Na figura 18, observa-se um corte de precisão com um fio de 0,15 mm de diâmetro e na figura 18, evidencia-se o detalhe das peças que são possíveis de se obter através deste processo. A precisão e a complexidade geométrica que a eletroerosão confere pode ser confrontada nas figuras 19 e 20, nas quais se apresentam componentes para instrumentos de medição de precisão e diversas geometrias que podem ser obtidas.

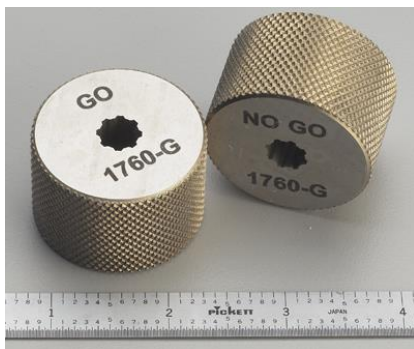


Figura 20 – Componentes de um instrumento de medição de precisão
Fonte: XACT EDM



Figura 21 – Diversas peças complexas obtidas por EDM
Fonte: XACT EDM

2.5 Seleção de Materiais da Ferramenta

O primeiro material utilizado como eletrodo foi o latão, devido à sua abundância e baixo custo. No entanto, o desgaste do mesmo, quando utilizado como ferramenta não é aceitável, e mais tarde consideraram-se utilizar cobre ou outras ligas que não o latão. Para além de se aumentar muito a condutividade, o desempenho do cobre como ferramenta é superior, uma vez que o seu desgaste é inferior (Guitrau 1997).

Com o avanço da tecnologia, utilização de CNC e programação de diversos parâmetros, o cobre tornou-se um material com limitações. O ponto de fusão do mesmo é da ordem dos 1083°C, enquanto que a temperatura registada na zona de descarga é de 10 000°C. Seria, portanto, necessário considerar um material cujo ponto de fusão fosse superior, de forma a evitar desgaste precoce da ferramenta.

Assim, surgiu a utilização da grafite em eletrodos devido à sua resistência ao desgaste térmico ser muito superior à resistência evidenciada por eletrodos de cobre. Este é um material que não sofre fusão, mas sim sublimação. Isto é, por volta dos 3500°C, a grafite passa do estado sólido a gasoso.

As operações de fabrico de um eletrodo em grafite são mais facilitadas do que no caso do cobre, uma vez que a grafite é um material com dureza inferior. A formação de rebarbas durante as operações de corte de cobre também são um aspeto negativo a ter em conta. No entanto, o corte de eletrodos de grafite promove a formação de bastante pó, o qual pode ser nocivo à saúde do operador, barramentos e guias da máquina-ferramenta, sendo necessário considerar a instalação ou reforço de sistemas de exaustão.

Existem outros fatores a ter em conta aquando da seleção de materiais, tais como a disponibilidade de fornecedores, o custo por quilograma de matéria prima, custo de maquinagem dos eletrodos, a taxa de remoção de metal suportada, acabamento superficial desejado, entre outros.

2.5.1 Materiais metálicos

Até este ponto, foi discutida apenas a utilização e comparação entre cobre e grafite. No entanto, há muitos materiais e ligas que podem ser igualmente selecionáveis, dependendo do material da peça em que se irá executar a erosão por EDM. Não existe, portanto, uma lista de materiais ideais, pois depende da combinação de materiais que se está a efetuar, do tipo de

operações a executar (acabamento ou desbaste), polaridade, tipo de lavagem, forma do eléctrodo, etc.

Conforme referido anteriormente, o latão/zinco foram os primeiros materiais a serem utilizados como eléctrodos em EDM. No entanto, não se revelou uma escolha viável.

Outros materiais metálicos utilizados em EDM são o cobre-telúrio, cobre-tungsténio, prata-tungsténio ou o elemento tungsténio.

2.5.1.1 Desgaste Teórico - materiais metálicos

É possível relacionar as propriedades dos materiais metálicos com o seu desgaste através da seguinte equação (Berghausen 1963).

$$F = 1.13(\rho * C)^{\frac{1}{2}} * \left(T_f + \frac{q * C}{2}\right) \quad [Watt.sec^2/cm^2] \quad (3)$$

Sendo:

- C = Calor específico a 25°;
- T_f = Temperatura de fusão;
- q = Condutividade térmica;
- ρ = Massa volúmica.

2.5.2 Grafite

Neste processo de fabrico, a utilização de grafite pode aparecer no estado puro ou com infiltrados. A escolha depende do nível de acabamento e detalhe que se pretende, sendo que se não é um aspeto a ter em elevada consideração, então deve utilizar-se grafite pura. Caso contrário, deverá seleccionar-se um material com elevada densidade e um tamanho de grão fino.

A introdução de uma mistura fina de partículas de cobre na matriz de grafite confere uma boa maquinabilidade e menor probabilidade de geração de um arco de corrente, devido à condutividade ser ligeiramente aumentada.

2.6 Materiais maquinados em EDM

Existe uma grande variabilidade de materiais que podem ser maquinados utilizando a EDM, sendo que a propriedade que devem ter todos em comum é a condutividade elétrica. Poder-se-ia pensar que materiais como os cerâmicos não seriam passíveis de serem maquinados por este processo, no entanto, existem materiais compósitos de matriz cerâmica como o dióxido de zircônio – ZrO_2 , nitreto de silício – Si_3N_4 ou Alumina – Al_2O_3 , nos quais uma adição de fases de nitreto de titânio – TiN ou de nitreto de carbono titânio – $TiCN$ lhes confere uma condutividade elétrica satisfatória para operações de remoção de material em eletroerosão (Lauwers et al. 2004).

Para além de compósitos com condutividade elétrica, existe um largo espectro de aplicabilidade de outros materiais com esta propriedade a um nível satisfatório, os materiais metálicos. No entanto, os materiais mais utilizados para este processo são materiais cuja dureza seja muito elevada, para que os processos de maquinagem tradicionais se tornem uma opção menos viável do que a eletroerosão. Os valores aceitáveis para a preferência de processos de maquinagem convencionais, como os processos por arranque de aparta, são da ordem dos 30 a 35 HRC para as ferramentas de corte mais comuns (Ho e Newman 2003).

Uma vantagem da utilização de eletroerosão para a maquinagem de aços é a possibilidade de a erosão poder ser executada nos valores de dureza máxima de cada aço, evitando problemas como variações dimensionais derivadas a tratamentos térmicos que seriam apenas executados após maquinagem convencional. Portanto, o aço pode ser maquinado em EDM após ter sofrido um tratamento térmico como uma têmpera, sendo que a variação dimensional introduzida por este tratamento não influencia o resultado final.

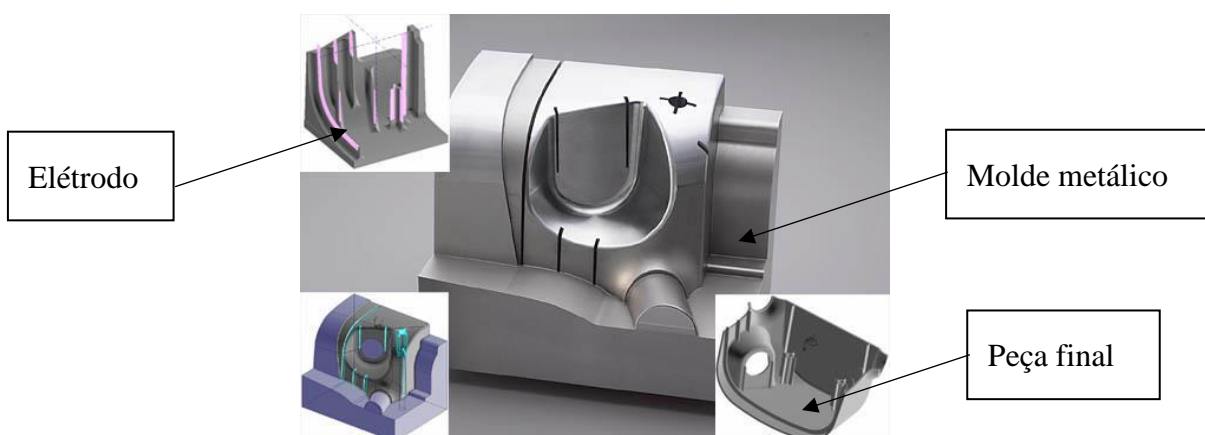


Figura 22 – Molde em NAK80 para injeção de plástico

Fonte: Sodick

Podemos encontrar na indústria aeronáutica, da saúde e até na indústria automóvel diversas aplicações deste processo, de acordo com os materiais que se pretendem maquinar. Por exemplo, na indústria automóvel, é corrente o fabrico de moldes metálicos para injeção de plástico através de eletroerosão.

A figura 22 apresenta um molde metálico em NAK80, um aço pré-endurecido com cerca de 40 HRC que foi maquinado por um eléctrodo em grafite. A profundidade de corte foi de 85 mm e um acabamento de 9,9 μm de rugosidade máxima no eixo vertical. O tempo de maquinagem foi de 8 horas e 30 minutos e apenas se utilizou um eléctrodo para a operação (Sodick 2016).

2.7 Superfície Maquinada - Modificações Estruturais (camada branca, HAZ, material base)

Devido à natureza do processo EDM, a superfície apresentada pela peça maquinada é bastante afetada pelas descargas elétricas e térmicas, e identificam-se três camadas distintas:

- *White Layer* ou *Recast Layer*;
- *Heat Affected Zone* – HAZ;
- Material base.

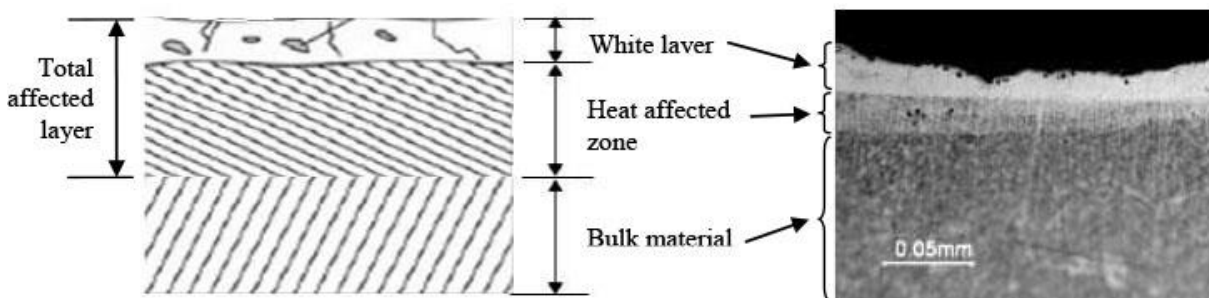


Figura 23 – Camadas características após EDM

Fonte: Scielo

Após a descarga elétrica, existirá a produção da cratera e uma quantidade de metal será fundida, voltando a tocar nas paredes dessa mesma cratera que estarão a uma temperatura inferior. Formar-se-á, então, uma camada de metal ressolidificado, normalmente com bastante carbono – *White Layer*.

No caso da eletroerosão por penetração, o fluido de trabalho é um óleo de hidrocarbonetos e as altas temperaturas envolvidas no processo provocam a migração de hidrocarbonetos do fluido para o metal fundido da peça. Por sua vez, este metal solidifica e apreende átomos de carbono na sua matriz.

No caso da eletroerosão por fio, esta camada é menos rica em carbono, uma vez que o fluido de trabalho é normalmente água e os óxidos formados durante o processo têm um efeito de diminuição do teor em carbono nesta camada. Também o material do eletrodo pode ser encontrado na matriz da peça trabalhada em eletroerosão. No caso de o eletrodo ser de cobre, por exemplo, as partículas deste material podem migrar para esta camada e baixar a dureza do metal base (Guitrau 1997).

Após a primeira camada, segue-se a camada afetada pelo calor – HAZ. Esta camada é constituída por metal que sofreu transformações metalúrgicas, sem ter atingido temperaturas de fusão. Podem apresentar duas transformações: uma camada reendurecida em que a temperatura

atingida permitiu uma austenitização e de seguida um arrefecimento drástico, de forma a ocorrer transformação martensítica; ou uma camada revenida, onde a temperatura não foi suficiente para permitir a austenitização.

Por fim, segue-se a camada de transição até ao metal base que constituía inicialmente a peça.

A espessura destas camadas depende, principalmente, dos valores de corrente e da frequência do impulso (Guitrau 1997).

2.8 Método Taguchi

2.8.1 Definição

Engenheiro e estatístico japonês, Dr. Genichi Taguchi, desenvolveu métodos com vista ao desenvolvimento do produto.

O objetivo deste método consiste em minimizar a variabilidade do produto, identificando os meios que lhe conferem robustez durante o processo de fabrico, perante as fontes de variação a que ele é submetido.

O conhecimento do processo sugere que determinados fatores de produção influenciem os valores exibidos pelo produto, para determinada característica a controlar. Se a relação funcional entre os *input's* (níveis desses fatores) e o valor do *output* (da característica a controlar) fosse conhecida, poder-se-ia esperar que os cálculos dos níveis em que os primeiros deveriam intervir, para se obter o valor-alvo do produto, fosse imediato.

No entanto, identificadas essas variáveis, existem ainda alguns fatores externos, não controláveis durante a produção e que exercem uma ação perturbadora, ocasionando desvios no valor real do *output*, em relação ao esperado. Identificam-se, portanto, variáveis intrínsecas que são as variáveis controláveis do processo, e extrínsecas, as de perturbação (ruído) (Castro 2013).

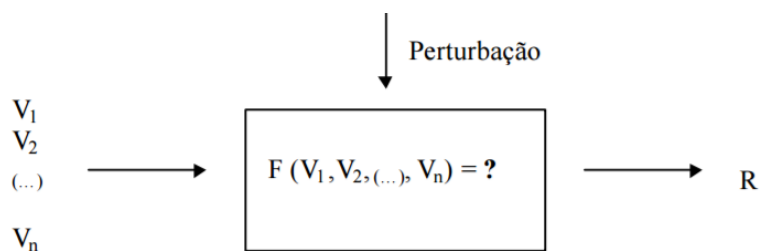


Figura 24 – Esquema representativo do sistema
Fonte: Castro

Na figura 24, apresenta-se um esquema representativo de um sistema ou fenómeno que pretendemos otimizar, sendo: V_n - Variável de produção intrínseca (controlável), de ordem n ; R - Resposta ou Saída, ou valor obtido para a característica a estudar e Perturbação - Ação combinada das variáveis (fatores) extrínsecas.

O não conhecimento da relação entre variáveis intrínsecas, extrínsecas e a resposta do sistema, representa uma limitação importante. Taguchi sugere que se realize um conjunto de experiências estatisticamente planeadas, em que as variáveis intrínsecas intervenham em níveis diferentes. É nesta fase que o método recorre ao desenho estatístico de experiências (DOE),

devendo cada experiência-tipo corresponder a uma combinação específica de níveis para as variáveis intrínsecas; ser replicada para diferentes condições das variáveis extrínsecas (também previamente planeadas).

As experiências simulam condições específicas de produção sob o efeito de fontes de variação e, analisados os resultados, identificar-se-á quais as variáveis intrínsecas que mais afetam a variabilidade, bem como quais os níveis em que elas deverão ser mantidas durante a produção, de modo a que essa variação seja mínima.

Identificada a solução proposta pelo método, é ainda necessário confirmar a melhoria (diminuição) da variabilidade, isto é, a obtenção de robustez, através da realização de nova experiência, desta vez com as variáveis intrínsecas a assumir os níveis propostos na etapa anterior (Castro 2013).

2.8.2 Matriz Ortogonal L_{18}

O desenho estatístico de experiências utilizado no presente documento foi uma matriz ortogonal de três níveis, a L_{18} (ver anexo A - Codificação de Parâmetros e Design de Experiências L_{18}).

Devido à sua configuração, esta matriz permite uma redução nos custos e tempo de execução de ensaios experimentais, uma vez que permite estudar quais os fatores significativos e identificar quais os níveis dos mesmos que melhoram a resposta ou característica do processo. No caso em concreto, a matriz L_{18} permite selecionar oito fatores (um a dois níveis e os restantes a três níveis) identificando dezoito ensaios previamente definidos pela própria matriz. Caso se pretendesse executar todas as combinações possíveis para os 8 fatores, teríamos que avaliar $2 \times 3^7 = 4374$ ensaios, o que pode representar um problema a vários domínios (William 1995).

Esta matriz é muito utilizada em Engenharia, uma vez que podemos avaliar as interações entre o fator da coluna 1 e 2. Para as interações restantes não podemos tecer nenhuma consideração, apenas que os efeitos das mesmas estão distribuídos por todos os fatores igualmente.

2.8.3 Etapas de um Design de Experiências

As etapas propostas pelo Método de Taguchi podem ser descritas a partir da seguinte sequência:

- 1) Identificação dos fatores do sistema;
- 2) Escolha dos níveis dos fatores a experimentar;
- 3) Seleção do modelo de experiências a adotar;
- 4) Condução da experiência;
- 5) Apuramento dos fatores significativos e dos respectivos ótimos;
- 6) Realização de experiência de confirmação.

Conhecidos os valores-alvo aos quais se pretende conferir robustez, a aplicação do método pode ser concretizada, mas, se não se tiver, à priori, um bom conhecimento do processo (situação mais frequente), poderá ser necessário uma repetição desta sequência de etapas para um conjunto de fatores e/ou níveis diferentes dos considerados na primeira fase.

2.8.4 Análise de respostas

Com vista a uma compreensão adequada de quais os fatores que têm maior influência na variável de saída, utiliza-se o método estatístico de análise de variância.

De entre os oito parâmetros escolhidos, deverão ser selecionados os que têm maior grau de significância, através da razão de variâncias ou do “valor F” de Fisher. Caso essa razão seja inferior a 2, conclui-se que o fator em estudo não tem significância na variável resposta (William 1995).

O passo seguinte consiste numa nova análise de variância, no qual a soma dos quadrados, variância, valor F e a percentagem de contribuição de cada fator são recalculados.

De seguida, é possível contruir um modelo de regressão linear que relaciona os parâmetros existentes e a variável de saída, obtendo-se previsões ou resultados teóricos de ensaios não realizados.

3 Planeamento do estudo do efeito da densidade de corrente

3.1 Apresentação do problema

Desde a introdução do processo de EDM que se realizam pesquisas e estudos com o objetivo de conhecer a influência dos parâmetros envolvidos no resultado final. Devido à inúmera combinação de fatores e variáveis envolvidas que afetam direta ou indiretamente o processo, ainda não se pode considerar que a EDM é um processo convencional, de relativa facilidade de projeto, execução e obtenção de bons resultados finais.

Introduzido pelo Prof. Dr. José Marafona, após diversos anos de trabalho e pesquisa, tornou-se necessário agora analisar o efeito da densidade de corrente no desempenho do eletrodo-ferramenta, variando as suas dimensões e utilizando impulso de corrente constante.

3.2 Preparação

3.2.1 Máquina EDM *Die Sinking* - Agie Compact 3

Neste trabalho, a máquina utilizada foi uma AGIE Compact 3. É uma máquina de eletroerosão por penetração que é programável em dois tipos distintos.



Figura 25 – Máquina AGIE Compact 3

O primeiro modo de funcionamento consiste na utilização de módulos do tipo “caixas negras” que controlam todo o processo (EXPERTON) e o segundo modo baseia-se numa programação mais morosa, em que é necessário definir todos os parâmetros de maquinagem (UNISSET).

Em todos os ensaios realizados para este documento foi utilizado o modo de programação UNISSET e apresenta-se uma das programações em anexo. (Ver ANEXO I: Programação Máquina Agie Compact 3)

Tabela 1 – Parâmetros configuráveis máquina AGIE Compact 3

Parâmetros Configuráveis
I: Intensidade de Corrente
U: Diferença de Potencial
GAIN: Ganho do Servo
T: Duração do Impulso
P: Duração da Pausa
S-BOX: Otimizações
POLARITY: Polaridade
EROSION SINGLE AXIS: Profundidade
2GAP: Duas vezes a <i>gap</i> escolhida
Impulse Control: ACO (<i>Adaptive Control Optimization</i>), ACC (<i>Adaptive Control Constraint</i>)
Relative Withdraw – Deslocamento do porta-ferramentas entre séries de descargas elétricas consecutivas

3.2.2 Elédrodo Ferramenta

Os eletrodos utilizados foram dimensionados previamente, de acordo com as suas áreas e volumes. Como o objetivo deste estudo será estudar o efeito da densidade de corrente, escolheram-se três áreas e três volumes diferentes. A sua seleção encontra-se justificada no capítulo posterior: “3.3 Seleção de fatores”.



Figura 26 – Elédrodo utilizado no estudo

O material utilizado para o eletrodo foi um aço de construção base melhorado, com maior estabilidade dimensional em serviço ou em operações de maquinagem, o C45E +N (Norma EN). Contém 0,42 a 0,50% de carbono e 0,50 a 0,80% de manganês e uma densidade de 7,84.

3.2.3 Workpiece

A peça utilizada para maquinagem é da forma de um cilindro, por forma a que o campo elétrico gerado tenha um efeito constante, uma vez que é uma forma cujo plano X-Y tem uma infinidade de planos de simetria.

O material utilizado foi o Alumínio 7075, cuja densidade tem o valor de 2,8.



Figura 27 – Peça utilizada nos ensaios

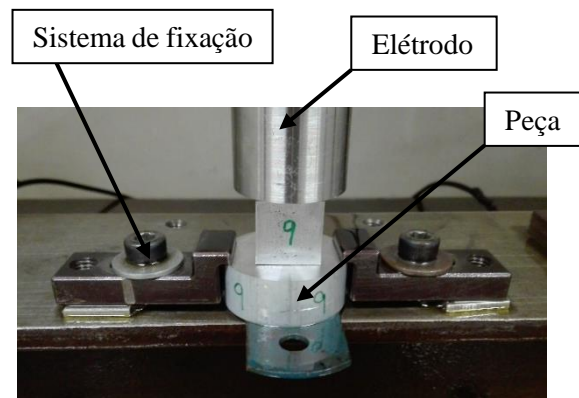


Figura 28 – Peça e eletrodos prontos

3.2.4 Medição do Peso

Para medição do peso inicial e final da peça a maquinar, e posterior cálculo de taxas de remoção de material, foi utilizada a balança de precisão Mettler H31AR.



Figura 29 – Balança de precisão Mettler

Esta balança permite efetuar medições até à decima do micrograma ($0,1 \mu\text{g}$ – precisão = $0,05 \mu\text{g}$). Requer bastante minúcia e atenção aquando da sua utilização, pois é sensível a vibrações ou a desníveis provocados, por exemplo, pelo apoio de braços na base onde se encontra a balança.

3.3 Seleção de Fatores

3.3.1 Volume

A seleção de fatores teria que passar obrigatoriamente pela variável em estudo (volume) e pelos fatores que tenham já mostrado sinais de alguma influência no valor da resposta.



Figura 30 – Volumes do Eletrodo

Para tal, dimensionaram-se três tipos de eletrodos com diferentes volumes e pontas roscadas para variação de forma e área, por forma a poupar material (Ver figura 30 e ANEXO B: Projeto de eletrodos).

O primeiro tipo de eletrodo contempla um volume na ordem de 11 cm^3 , o segundo com 23 cm^3 e o terceiro com 34 cm^3 , de maneira a se obter um rácio de uma, duas e três vezes o primeiro volume.

3.3.2 Forma

De acordo com Sohani et al. (2009), a forma tem influência no desempenho do eletrodo-ferramenta. Analisando os seus trabalhos de pesquisa, conclui-se que é um parâmetro com importância na análise.

Em teoria, a forma influencia a distribuição do campo magnético, a eficácia da lavagem, a distribuição de calor, entre outros. Na figura seguinte, podemos observar que é expectável que os cantos sofram uma erosão superior devido à concentração do campo magnético ser também superior.

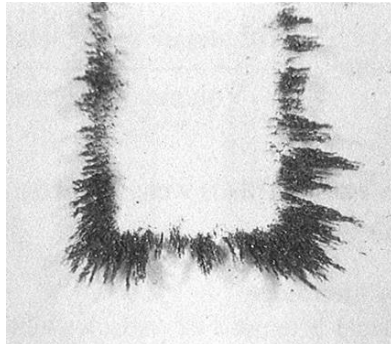


Figura 31 – Distribuição do Campo Magnético Fonte: Poco Graphite, Inc.

Neste trabalho, foram analisados dois tipos de formas: quadrangular e circular.

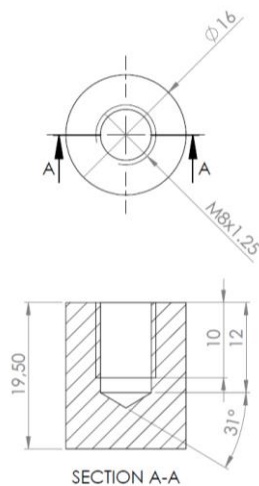


Figura 32 – Eléctrodo Circular

Tolerânciamento Geral
ISO 2768 – Classe M

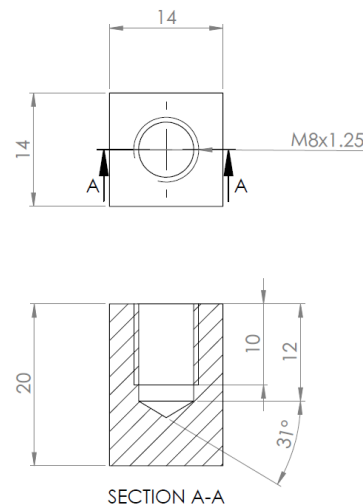


Figura 33 – Eléctrodo Quadrangular

3.3.3 Área

A área também desempenha um papel importante no estudo em concreto, tendo sido incluído o estudo de três áreas diferentes: 200, 300 e 400 mm². A variação deste parâmetro foi possível através da utilização de pontas roscadas, conforme indicado na figura 32 e 33.

3.3.4 Outros Fatores

Tabela 1 – Parâmetros e codificação – Método de Taguchi

Parâmetros	Notação		Unidade	Níveis		
	Natural	Codificada		1	2	3
Forma	<i>Shape</i>	X_1	--	Quadrangular	Circular	--
Área da ferramenta	<i>Area</i>	X_2	mm ²	200	300	400
Volume	<i>Volume</i>	X_3	mm ³	11 416	23 362	34 671
Intensidade da corrente	<i>I</i>	X_4	A	15,8	19,3	25,4
Diferença de Potencial	<i>U</i>	X_5	V	80	100	120
Pausa	<i>T_{off}</i>	X_6	μs	32	42	56
Tempo de Descarga	<i>T_{on}</i>	X_7	μs	180	240	320
Ganho do Servo	<i>Gain</i>	X_8	--	10%	15%	20%

A análise também passou por outros fatores, tais como a intensidade de corrente, diferença de potencial, tempo de pausa, tempo de descarga e o ganho do servo. Na tabela 2, é possível evidenciar quais os parâmetros e a codificação utilizada neste estudo.

3.3.5 Fatores constantes

No projeto das operações de maquinagem em EDM é necessário definir outros parâmetros, que neste trabalho se mantiveram constantes, devido ao número limitado de variáveis na análise através do Método de Taguchi.

Tabela 2 – Parâmetros Constantes

Parâmetros	Notação Natural	Unidade	Valor
CONSTANTES			
Compression Ratio	<i>Comp</i>	%	35
M	<i>M</i>	mm	0.72
2GAP	<i>2GAP</i>	mm	0.36
ACO (otimização)	<i>ACO</i>	--	154
ACC (restrição)	<i>ACC</i>	--	02
Timer Speed	<i>Velocidade do Eletrodo</i>	mm/min	700
Erosion Time	<i>T_{erosion}</i>	s	30
Profundidade	<i>Depth</i>	mm	6
Relative Withdraw	<i>Relative Withdraw</i>	mm	1.5
S-BOX	<i>S-BOX</i>	--	0
Polaridade do Eletrodo	<i>Polaridade do Eletrodo</i>	--	Positiva
MODE	<i>MODE</i>	--	1

3.4 Guia de Ensaios

Até este ponto do documento, já se conhece a máquina e todos os fatores envolvidos no estudo. Como apresentado no “Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica”, para o planeamento dos ensaios foi utilizada a matriz L_{18} do Método de Taguchi. Após codificação de todos os fatores, apresenta-se a ordem dos ensaios e suas características na tabela seguinte.

Tabela 3 – Planeamento dos Ensaios Experimentais

Ensaio Nº	X ₁ FORMA	X ₂ AREA [mm ²]	X ₃ VOLUME [mm ³]	X ₄ INT [Amper]	X ₅ DDP [Volt]	X ₆ PAUSA [µs]	X ₇ TEMPO DE DESCARGA [µs]	X ₈ GANHO DO SERVO
1	Quadrangular	200	11 416	15,8	80	32	180	10
2	Quadrangular	200	23 362	19,3	100	42	240	15
3	Quadrangular	200	34 671	25,4	120	56	320	20
4	Quadrangular	300	11 416	15,8	100	42	320	20
5	Quadrangular	300	23 362	19,3	120	56	180	10
6	Quadrangular	300	34 671	25,4	80	32	240	15
7	Quadrangular	400	11 416	19,3	80	56	240	20
8	Quadrangular	400	23 362	25,4	100	32	320	10
9	Quadrangular	400	34 671	15,8	120	42	180	15
10	Circular	200	11 416	25,4	120	42	240	10
11	Circular	200	23 362	15,8	80	56	320	15
12	Circular	200	34 671	19,3	100	32	180	20
13	Circular	300	11 416	19,3	120	32	320	15
14	Circular	300	23 362	25,4	80	42	180	20
15	Circular	300	34 671	15,8	100	56	240	10
16	Circular	400	11 416	25,4	100	56	180	15
17	Circular	400	23 362	15,8	120	32	240	20
18	Circular	400	34 671	19,3	80	42	320	10

3.5 Variáveis de Resposta

Sendo o principal objetivo compreender a relação entre a densidade de corrente e o desempenho do eletrodo-ferramenta, devem-se considerar as saídas que façam considerações diretas sobre a performance.

Estas podem ser o MRR (*Metal Removal Rate*), TW (*Tool Wear*) e a Rugosidade.

3.5.1 Material Removal Rate

O MRR é uma variável de resposta que mede a taxa de remoção de material da peça que se pretende maquinar por EDM.

$$MRR = \frac{\text{Variação da massa da peça}}{\text{Densidade} \times \text{Tempo de erosão}} \quad [mm^3/min] \quad (4)$$

3.5.2 Tool Wear

O TW é uma variável de resposta que mede a taxa de desgaste do eletrodo-ferramenta que se utiliza na maquinação por EDM.

$$TW = \frac{\text{Variação da massa do eletrodo}}{\text{Densidade} \times \text{Tempo de erosão}} \quad [mm^3/min] \quad (5)$$

O Tool Wear Ratio também é utilizado neste tipo de estudos e é expresso pelo quociente das taxas TW e MRR.

$$TWR = \frac{TW}{MRR} \times 100 \quad [\%] \quad (6)$$

3.5.3 Rugosidade

A rugosidade é uma variável de resposta que mede o grau de acabamento superficial obtido após a maquinação. A medição da rugosidade pode ser expressa através de *standards* Americanos (Ra – Rugosidade média aritmética) ou do *standard* Europeu VDI (Graphite 2014).



Figura 34 – Exemplo de uma placa com escalas VDI Fonte VDI3400

A escala VDI e a medição da rugosidade aritmética estão relacionadas através da seguinte equação:

$$VDI N^{\circ} = 20 \log_{10}(10 \times Ra) \quad (7)$$

Esta escala foi criada pela Associação de Engenheiros Alemães VDI e estabelece diversos *standards* de suporte aos profissionais de engenharia (VDI 2017). Esta escala está muito relacionada com o processo de Eletroerosão e muitas empresas do ramo utilizam-na como referência para os clientes globais (VDI3400 2017).

Durante este estudo, foi utilizado um rugosímetro Hommel Tester T500.

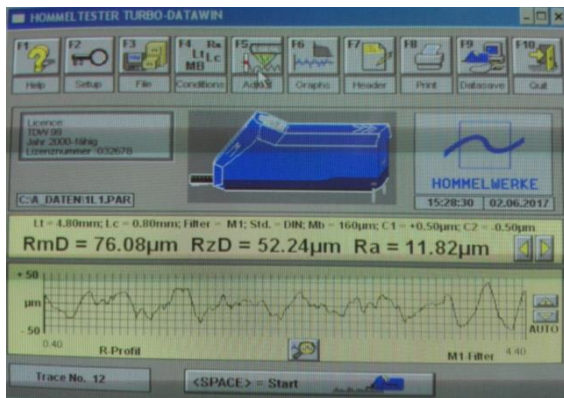


Figura 35 – Software utilizado na medição de rugosidade



Figura 36 – Rugosímetro utilizado

Para medição da rugosidade, devem selecionar-se os parâmetros “Lc” e “Lt”, de acordo com a rugosidade esperada.

4 Análise de Resultados

Na tabela 4, apresentam-se os resultados obtidos dos dezoito ensaios realizados (ver tabela 3) de acordo com o *design* escolhido no Método de Taguchi (Ver ANEXO A: Codificação de Parâmetros e *Design* de experiências L₁₈).

A variável de saída direta dos ensaios foi a variação de peso da peça (WRW) e do eletrodo (TWW), tempo de erosão e rugosidade. Com recurso ao valor da densidade dos materiais envolvidos e do tempo de erosão, calcularam-se as taxas de remoção de material da peça e do eletrodo.

Tabela 4 – Resultados obtidos após conclusão dos ensaios: MRR e TW

Ensaio Nº	Tempo [min]	WRW [g]	TWW [g]	MRR [mm ³ .min ⁻¹]	TW [mm ³ .min ⁻¹]
1	13,92	3,2534	0,0872	83,3846	0,8247
2	10,43	3,3445	0,0862	114,3679	1,1006
3	8,15	3,4266	0,0772	150,3067	1,252
4	17,67	5,0508	0,1702	102,0697	1,2271
5	13,57	5,1098	0,1573	134,4878	1,5039
6	8,88	5,2077	0,1313	209,5399	1,8673
7	15,63	6,6464	0,2105	151,9514	1,7137
8	9,85	6,673	0,1931	241,8419	2,4604
9	22,92	6,5492	0,2705	102,0631	1,5026
10	89,00	3,3121	0,5356	13,2825	0,7739
11	13,90	3,4249	0,0706	87,8726	0,6423
12	10,76	3,3632	0,0724	111,4206	0,829
13	12,16	5,1489	0,1468	151,1328	1,5721
14	10,00	5,0921	0,1321	181,7857	1,6582
15	17,40	4,9409	0,1947	101,3957	1,3928
16	11,57	6,773	0,2699	208,9764	2,9766
17	20,90	6,4237	0,262	109,7061	1,5868
18	14,47	6,6415	0,2702	163,8859	2,38

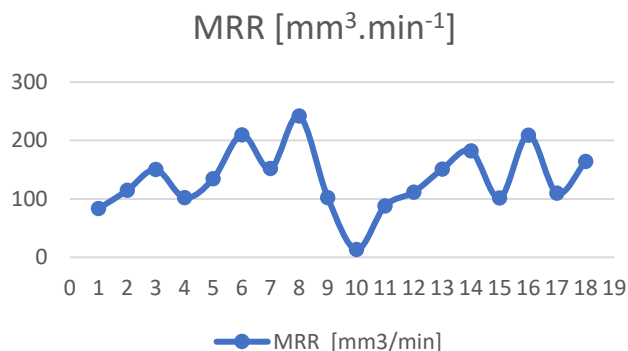


Figura 38 - Variação de MRR em cada ensaio

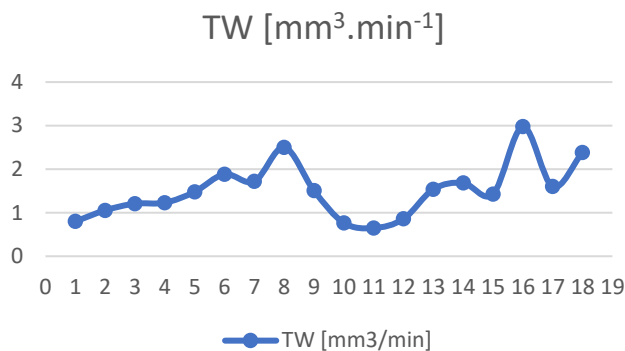


Figura 37 - Variação de TW em cada ensaio

Experimentalmente, também se mediram os valores de rugosidade (R_z , R_a e R_{mD}) e calculou-se o quociente TWR. Apresenta-se a evolução destas variáveis de resposta com os ensaios realizados nos seguintes gráficos.

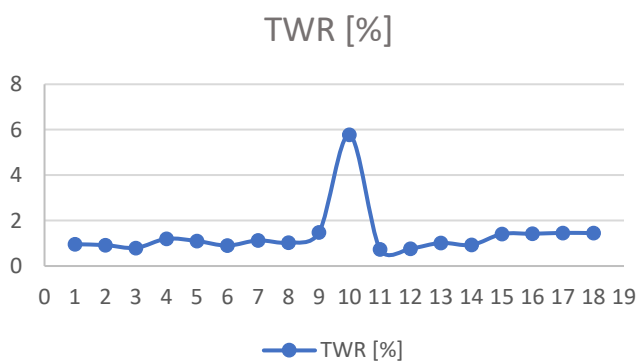


Figura 40 - Variação de TWR em cada ensaio

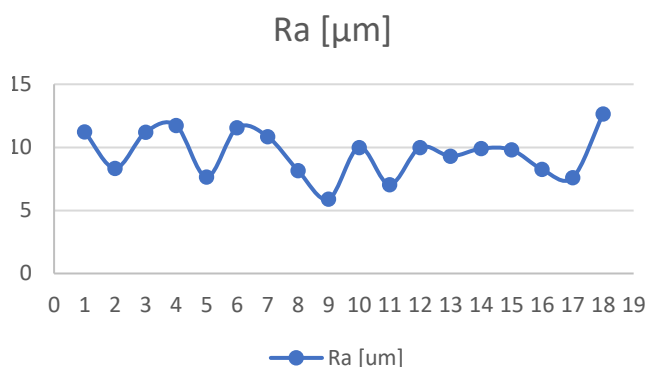


Figura 39 - Variação de Rugosidade média Aritmética em cada ensaio

Tabela 5 - Resultados obtidos após conclusão dos ensaios – TWR e Ra

Ensaio Nº	TWR [%]	Rugosidade [Ra - μm]
1	0,96	11,23
2	0,92	8,35
3	0,8	11,20
4	1,2	11,74
5	1,1	7,65
6	0,9	11,55
7	1,13	10,85
8	1,03	8,15
9	1,48	5,90
10	5,78	10,00
11	0,74	7,05
12	0,77	10,00
13	1,02	9,30

14	0,93	9,90
15	1,41	9,80
16	1,42	8,25
17	1,46	7,60
18	1,45	12,65

Numa primeira análise, é possível concluir que a taxa de remoção de metal varia entre cerca de 100 e 200 mm³.min⁻¹, existindo dois extremos absolutos, ensaios número 8 e 10.

O oitavo ensaio tinha como configuração a área, intensidade e tempo de descarga máximos e um tempo de pausa mínimo, sendo, portanto, um ensaio em que o valor da resposta teria que ser inevitavelmente alto (241,8 mm³.min⁻¹).

O décimo ensaio foi configurado com intensidade e diferença de potencial máximas e tempos de descarga e de pausa médios, no entanto, a sua configuração geométrica influenciou para que a variação de massa não tenha sido notória. Também o seu tempo de erosão muito elevado, em comparação com os restantes ensaios, contribuíram para o resultado obtido. Neste ensaio, houve transferência de massa do eletrodo para a peça e vice-versa.



Figura 41 – Peça maquinada e eletrodo número 10

Uma justificação provável para este baixo resultado (13,3 mm³.min⁻¹), será que o campo magnético gerado por esta forma circular é cilíndrico e prejudica a lavagem, uma vez que impõe que os detritos se concentrem no centro. Até à profundidade de 3 milímetros, o ensaio decorreu sem problemas, mas desta cota até ao fim, verificou-se instabilidade na erosão devido a uma lavagem ineficaz, aumentando exponencialmente o tempo de erosão.

Analisando a variação da resposta TW, observa-se que esta variou entre valores da ordem dos 0,8 a 2,5 mm³.min⁻¹, sendo estes valores muito menores que o desgaste sofrido pela peça a maquinar. Os ensaios cujos valores se revelaram críticos foram o ensaio número 8 e o ensaio

número 16. Ambos foram executados com uma intensidade de corrente e área máximas. No oitavo ensaio, utilizou-se o tempo de descarga máximo e de pausa mínimo, enquanto que no 16 se utilizou precisamente o contrário. No entanto, o oitavo ensaio não teve o valor de desgaste do eletrodo máximo, e sendo a diferença de potencial utilizada igual para ambos os ensaios, apenas varia o ganho do servo, o volume do eletrodo e a forma. É então possível que nesta análise se possa afirmar que um ou mais destes fatores sobranes possam ter uma influência no sentido de minimizar o desgaste do eletrodo. Utiliza-se, então, nos próximos subcapítulos, várias ferramentas estatísticas para se confirmar com maior exatidão quais os fatores significativos e qual a sua influência no resultado final.

Quanto à variável TWR, variou entre cerca de 0,74 e 1,48 %, existindo apenas um ensaio em que o valor se destacou, o ensaio número 10 com 5,78%. Este valor é justificado com o valor baixo de taxa de remoção de material.

Por fim, a rugosidade média aritmética variou entre cerca de 5,90 e 12,65 μm .

4.1 MRR - Material Removal Rate

4.1.1 Gráfico de Efeitos Principais

Através do software MiniTab, foi possível analisar o efeito de cada fator nas suas variáveis de saída. Sendo a variável de saída a taxa de remoção de material da peça, o seu valor pretende-se que seja majorado (“*Bigger the better*”).

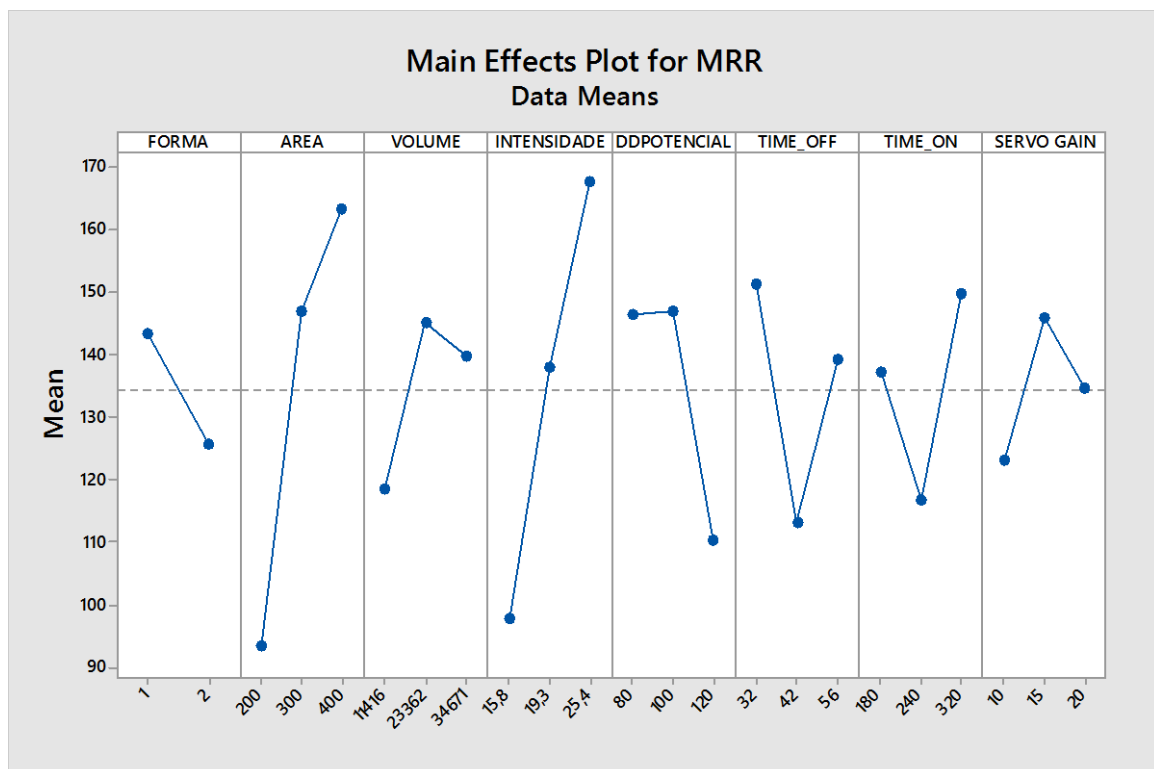


Figura 42 – Gráfico de efeitos principais MRR

Analisando a figura 42, é possível concluir que o valor médio para o MRR é 134,45 mm³/min e devido a ser desejável que a resposta MRR seja majorada, escolhemos os níveis com maior média para níveis ótimos. Desde já, podemos observar que os fatores que mais se destacam e que induzem uma maior variação na resposta são a área e a intensidade de corrente. Observa-se também que existe uma relação de proporcionalidade direta entre estes dois fatores e a taxa de remoção de metal da peça, MRR.

4.1.2 Análise de Variância

Tabela 6 – ANOVA para MRR

Análise de Variância para MRR

	X _{erro}	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X _{total}
Soma dos quadrados	1681	1420	15899	2376	14732	5312	4591	3302	1532	50845
Graus de Liberdade	2	1	2	2	2	2	2	2	2	17
Variância	840,5	1420	7949,5	1188	7366	2656	2295,5	1651	766	
Valor F	-	1,7	9,5	1,4	8,8	3,2	2,7	2	0,9	
% de Contribuição	3,3	2,8	31,3	4,7	29	10,4	9	6,5	3	
Intervalo de confiança	-	-	90	-	90	90	90	90	-	

Os resultados obtidos através da ANOVA mostram que a forma, o volume e o ganho do servo não têm uma variância significativa em relação à variância atribuída ao erro, portanto devem ser considerados como fatores com pouca significância. Por outro lado, a área da superfície do eletrodo e a intensidade de corrente são os fatores que desempenham um papel de maior importância no resultado final de MRR.

4.1.3 Análise de Variância considerando apenas os fatores significativos

Tabela 7 – ANOVA para MRR após eliminação de fatores menos significantes

Análise de Variância para MRR considerando apenas os fatores significativos

	X _{erro}	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X _{total}
Soma dos quadrados	7008	-	15 899	-	14732	5312	4591	3302	-	63779
Graus de Liberdade	7	-	2	-	2	2	2	2	-	17
Variância	1001	-	7949,5	-	7366	2656	2295,5	1651	-	
Valor F	-	-	7,9	-	7,4	2,7	2,3	1,6	-	
% de Contribuição	13,8	-	31,3	-	29	10,4	9	6,5	-	
Intervalo de confiança	90	-	90	-	90	90	90	90	-	

Executou-se a mesma análise apenas contabilizando os fatores considerados significativos. Verifica-se assim que o volume ou densidade de corrente volumétrica não aparenta ter uma influência muito significativa para a taxa de remoção de material da peça. O valor do Teste-F tem de ser superior a 2 para se poder ter em conta que o fator tenha uma influência considerável no resultado da resposta.

No entanto, a figura 42 indica que, pelo menos, até ao volume 23 362 mm³, a taxa de remoção de material aumenta com o aumento do volume, até um máximo. Para volumes superiores, a influência aparenta ser negativa.

4.1.4 Coeficientes do Modelo de Regressão Linear

Com vista a se obter previsões de resultados de ensaios não realizados, é possível elaborar um modelo de regressão. No caso em concreto, o modelo que melhor se ajusta é um modelo de regressão linear. Consideraram-se apenas os fatores com maior significância, e o valor do coeficiente de determinação múltipla (R^2) foi de 86,22% e o ajustado ($R^2_{ajustado}$) foi de 66,53%.

Os valores obtidos para os coeficientes estão presentes na equação (8). Será de esperar que, quanto maior for o valor do coeficiente, maior será a sua importância na resposta.

$$\begin{aligned}
 MRR = & 134,45 - 41,0 \text{ AREA_200} + 12,3 \text{ AREA_300} + 28,7 \text{ AREA_400} \\
 & - 36,6 \text{ INTENSIDADE_15,8} + 3,5 \text{ INTENSIDADE_19,3} \\
 & + 33,2 \text{ INTENSIDADE_25,4} + 12,0 \text{ DDPOTENCIAL_80} \\
 & + 12,3 \text{ DDPOTENCIAL_100} - 24,3 \text{ DDPOTENCIAL_120} \\
 & + 16,8 \text{ TIME_OFF_32} - 21,5 \text{ TIME_OFF_42} + 4,7 \text{ TIME_OFF_56} \\
 & + 2,7 \text{ TIME_ON_180} - 17,8 \text{ TIME_ON_240} \\
 & + 15,1 \text{ TIME_ON_320} \text{ [mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

4.1.5 Níveis ótimos

Na figura 43, apresentam-se os níveis que maximizam a variável de resposta e na tabela 8 exibe-se a previsão do valor de MRR máximo.

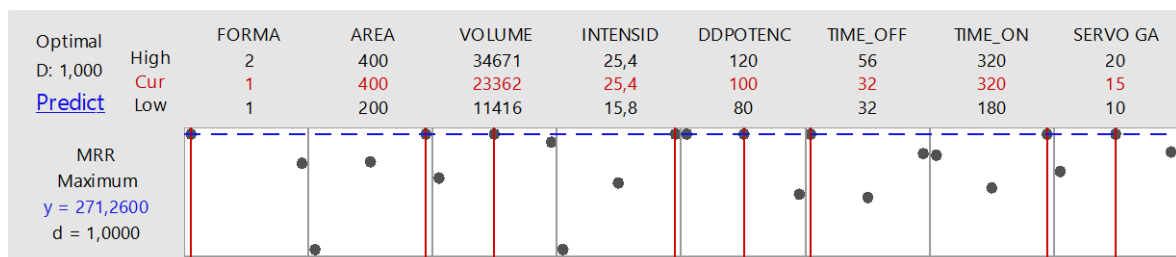


Figura 43 - Níveis ótimos obtidos em MiniTab

Tabela 8 – Níveis ótimos de MRR e MRR Máximo

Níveis ótimos para MRR

Forma	Quadrangular	Volume	23362	Diferença de potencial	100	Tempo de Descarga	320
Área	400	Intensidade de Corrente	25,4	Tempo de Pausa	32	Ganho Servo	15
MRR máximo [mm³.min⁻¹]			240,6				

Para o cálculo da previsão através do modelo de regressão linear, utilizando os valores dos níveis ótimos, utilizaram-se apenas os fatores significativos. Estes mostraram ser significativos uma vez que aproximam mais o valor da resposta prevista ao valor obtido experimentalmente. No subcapítulo “4.5 – Validação Experimental de Níveis Ótimos”, podem comparar-se ambos os tipos de resultados.

4.2 TW - Tool Wear Rate

4.2.1 Gráfico de Efeitos Principais

- Método estatístico de Análise de Variância - **ANOVA**

O mesmo tipo de análise foi efetuado para o valor da taxa de desgaste do eletrodo. O seu valor deve ser minorado (*“Smaller the better”*).

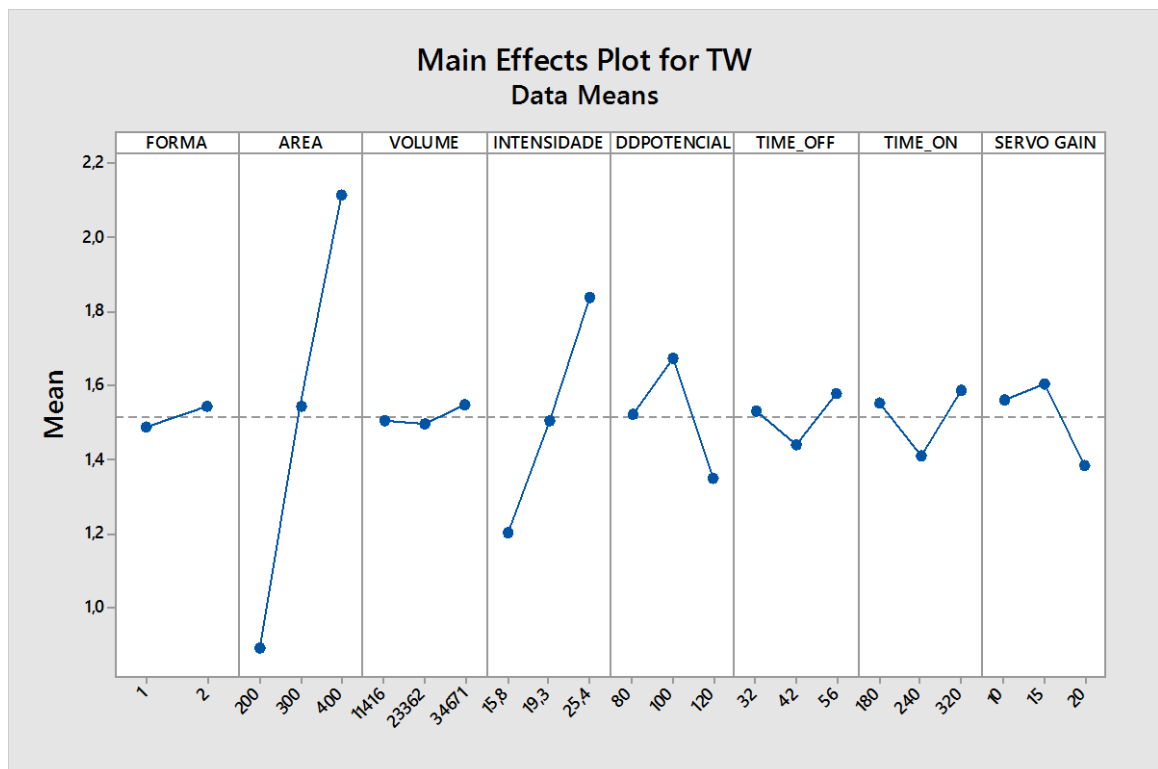


Figura 44 – Gráfico de efeitos principais TW

Analisando a figura 44, é possível concluir que o valor médio para o TW é $1,514 \text{ mm}^3/\text{min}$ e devido a ser desejável que a variável TW seja minorada, escolhemos os níveis com menor média para níveis ótimos. É expectável que a área seja o fator com maior contribuição para a variação da resposta TW, e que a sua relação seja de proporcionalidade direta com o desgaste do eletrodo.

4.2.2 Análise de Variância

Tabela 9 – ANOVA para TW

Análise de Variância para TW

	X _{erro}	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X _{total}
Soma dos quadrados	0,3438	0,0141	4,5043	0,0084	1,2137	0,3158	0,06	0,1046	0,1615	6,7263
Graus de Liberdade	2	1	2	2	2	2	2	2	2	17
Variância	0,1719	0,0141	2,2522	0,0042	0,6069	0,1579	0,03	0,0523	0,0808	
Valor F	-	0,08	13,1	0,02	3,53	0,92	0,17	0,3	0,47	
% de Contribuição	5,1	0,2	67	0,1	18	4,7	0,9	1,6	2,4	
Intervalo de confiança	-	-	90	-	90	-	-	-	-	

Os resultados obtidos através da ANOVA do desgaste do eletrodo mostram que apenas a área do eletrodo e a intensidade têm influência significativa na taxa de desgaste do eletrodo. Quanto ao fator em estudo, o volume ou densidade de corrente volumétrica é um fator cuja influência é a menor de todos os fatores escolhidos, uma vez que o valor-F obtido é o menor.

4.2.3 Análise de Variância considerando apenas os fatores significativos

Tabela 10 – ANOVA para TW após eliminação de fatores menos significantes

Análise de Variância para TW considerando apenas os fatores significativos

	X _{erro}	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X _{total}
Soma dos quadrados	1,0083	-	4,5043	-	1,2137	-	-	-	-	6,7263
Graus de Liberdade	13	-	2	-	2	-	-	-	-	17
Variância	0,0776	-	2,2522	-	0,6069	-	-	-	-	
Valor F		-	29,04	-	7,82	-	-	-	-	
% de Contribuição	15	-	67	-	18	-	-	-	-	
Intervalo de confiança		-	90	-	90	-	-	-	-	

Verifica-se, assim, que o volume ou densidade de corrente não aparenta ter uma influência significativa para a taxa de desgaste do eletrodo. A análise indica que o fator com maior influência no desgaste do eletrodo é a área e, de seguida, a intensidade da corrente.

4.2.4 Coeficientes do Modelo de Regressão Linear

Para a resposta *Tool Wear*, o modelo que melhor se ajusta é um modelo de regressão linear. Consideraram-se apenas os fatores com maior significância, e o valor do coeficiente de determinação múltipla (R^2) foi de 85,01% e o ajustado (R^2_{ajustado}) foi de 80,40%.

Os valores obtidos para os coeficientes estão presentes na equação (9). Será de esperar que, quanto maior for o valor do coeficiente na resposta, maior será a sua importância.

$$\begin{aligned}
 TW = & 1,5144 - 0,6254 \text{ AREA_200} + 0,0263 \text{ AREA_300} + 0,5991 \text{ AREA_400} \\
 & - 0,3131 \text{ INTENSIDADE_15,8} - 0,0096 \text{ INTENSIDADE_19,3} \\
 & + 0,3227 \text{ INTENSIDADE_25,4} \text{ [mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]
 \end{aligned} \quad (9)$$

4.2.5 Níveis ótimos

Na figura 45, apresenta-se a melhor combinação dos níveis de fatores e na tabela 11, exibe-se o valor de TW mínimo considerando os fatores significativos.

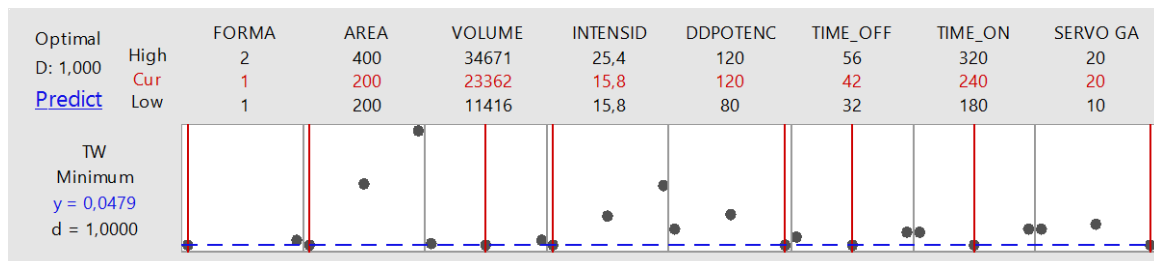


Figura 45 - Níveis ótimos para TW

Tabela 11 – Níveis ótimos TW e TW mínimo

Níveis ótimos para TW

Forma	Quadrangular	Volume	23 362	Diferença de potencial	120	Tempo de Descarga	240
Área	200	Intensidade de Corrente	15,8	Tempo de Pausa	42	Ganho Servo	20
TW mínimo [mm3.min-1]			0,5759				

4.3 TWR - Tool Wear Ratio

4.3.1 Gráfico de Efeitos Principais

- Método estatístico de Análise de Variância – ANOVA

  possível relacionar os fatores estudados com a variável de resposta TWR, uma vez que esta variável é o quociente entre MRR e TW. O seu valor deve ser minorado (*“Smaller the better”*).

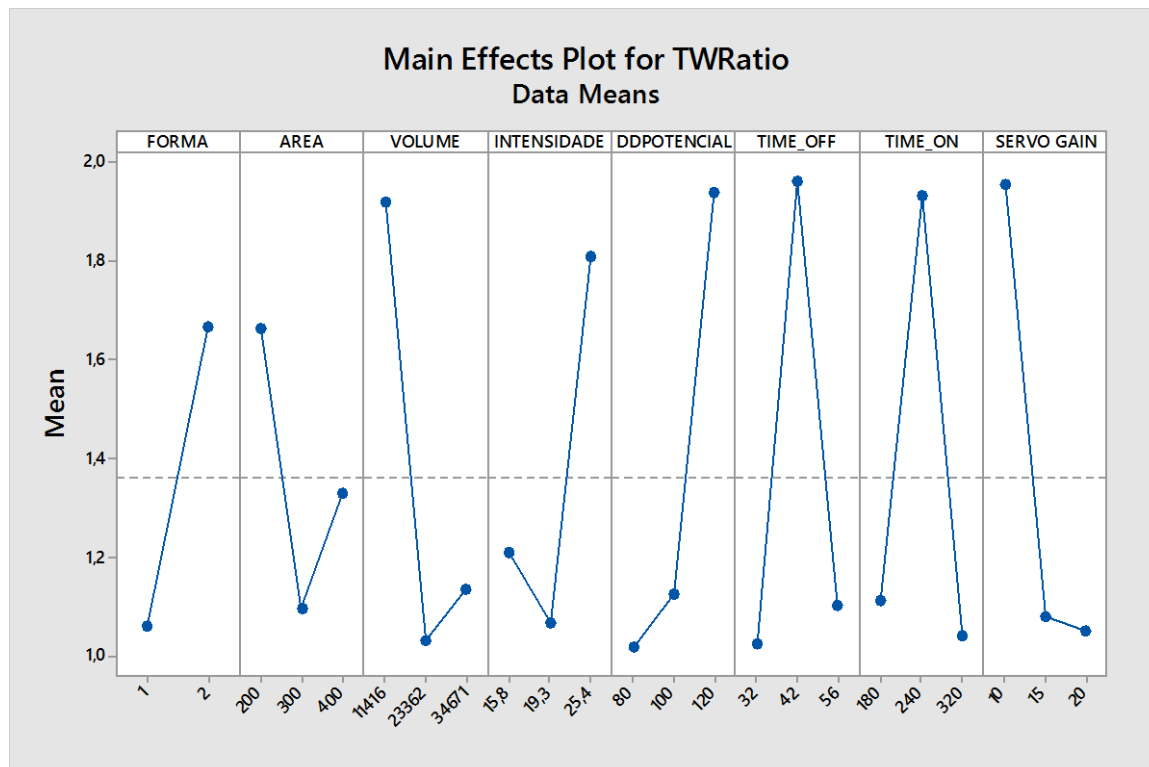


Figura 46 – Gráfico de efeitos principais TWR

Através da figura 46, podemos observar desde já que os valores dos extremos de cada fator estão muito próximos (comparando o valor máximo e mínimo de um fator com outro fator) e, como tal, é expectável que não existam fatores com influência demarcada uns nos outros.

Como o desgaste do elétrodo é muito inferior em comparação com a quantidade de massa removida   peça, os valores para a média também devem ser baixos (1,361%), devido ao quociente entre TW e MRR.

4.3.2 Análise de Variância

Tabela 12 – ANOVA para TWR

Análise de Variância para TWR

	X _{erro}	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X _{total}
Soma dos quadrados	1,9694	1,6562	0,9787	2,8275	1,8751	3,051	3,2456	2,9616	3,1773	21,7418
Graus de Liberdade	2	1	2	2	2	2	2	2	2	17
Variância	0,9847	1,6562	0,4894	1,4138	0,9376	1,5255	1,6228	1,4808	1,5887	
Valor F	-	1,68	0,5	1,44	0,95	1,55	1,65	1,5	1,61	
% de Contribuição	9,1	7,6	4,5	13	8,6	14	14,9	13,6	14,6	
Grau de Significância	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Os resultados obtidos através da ANOVA não são conclusivos acerca de qual o parâmetro que apresenta uma influência significativa. As contribuições são muito semelhantes para cada um dos fatores.

É possível que uma justificção para estes resultados se fique a dever à natureza da variável de resposta estudada. TWR é uma combinação de duas variáveis diferentes (TW e MRR) e, portanto, a variável TWR reflete influências das duas variáveis.

Por exemplo, analisando isoladamente o fator área, observamos que para as variáveis de resposta TW e MRR, o aumento deste fator implica um aumento também destas duas variáveis de resposta. Sendo TWR o resultado do quociente entre TW e MRR, prevê-se que os aumentos destes dois últimos mantenham o valor de TWR mais ou menos estável.

4.4 Rugosidade

4.4.1 Gráfico de Efeitos Principais

- Método estatístico de Análise de Variância - **ANOVA**

Por fim, a mesma análise foi efetuada para o valor de rugosidade média aritmética registado. O seu valor deve ser minorado (“*Smaller the better*”).

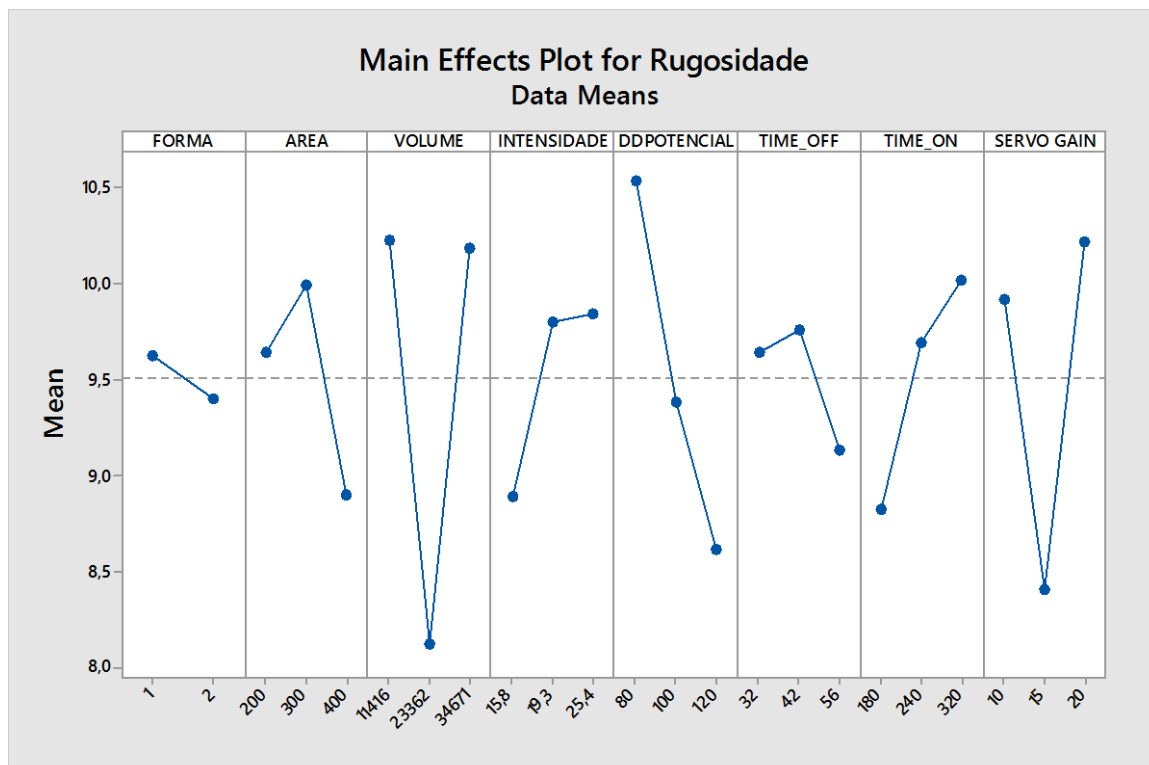


Figura 47 – Gráfico de efeitos principais Ra

Analisando a figura 47, é possível concluir que o valor médio para a rugosidade aritmética é de 9,509 μm e, devido a ser desejável que a variável de resposta rugosidade seja minorada, escolhemos os níveis com menor média para níveis ótimos.

Verifica-se, desde já, que a diferença de potencial deve ser um dos fatores com maior influência e que é inversamente proporcional à rugosidade média aritmética obtida no final do processo de maquinagem.

4.4.2 Análise de Variância

Tabela 13 – ANOVA para Rugosidade

Análise de Variância para Rugosidade

	X _{erro}	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X _{total}
Soma dos quadrados	4,868	0,238	3,714	17,465	3,496	11,322	1,3151	4,571	11,351	58,339
Graus de Liberdade	2	1	2	2	2	2	2	2	2	17
Variância	2,434	0,2381	1,8569	8,7323	1,748	5,6608	0,6576	2,2855	5,6754	
Valor F	-	0,1	0,76	3,59	0,72	2,33	0,27	0,94	2,33	
% de Contribuição	8,3	0,4	6,4	29,9	6	19,4	2,3	7,8	19,5	
Grau de Significância	-	-	-	90	-	90	-	-	90	

Os resultados obtidos através da ANOVA mostram que o volume, a diferença de potencial e o ganho do servo têm influência significativa no acabamento superficial da peça.

Com uma contribuição de 29,9% no resultado em comparação com os restantes fatores, a densidade de corrente aparenta ser dos fatores mais influentes na variável de resposta rugosidade. Analisando a figura 47, conclui-se que para as características do ensaio (materiais envolvidos, formas, massas, etc.) o volume que apresenta o melhor resultado de acabamento é o nível médio (23 362 mm³).

4.4.3 Análise de Variância considerando apenas os fatores significativos

Tabela 14 – ANOVA para Rugosidade após eliminação de fatores menos significativos

Análise de Variância para a Rugosidade considerando apenas os fatores significativos

	X _{erro}	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X _{total}
Soma dos quadrados	18,2	-	-	17,46	-	11,32	-	-	11,35	58,34
Graus de Liberdade	11	-	-	2	-	2	-	-	2	17
Variância	1,6545	-	-	8,73	-	5,66	-	-	5,675	
Valor F	-	-	-	5,28	-	3,42	-	-	3,43	
% de Contribuição	31,2	-	-	29,9	-	19,4	-	-	19,5	
Grau de Significância	-	-	-	90	-	90	-	-	90	

4.4.4 Coeficientes do Modelo de Regressão Linear

Os coeficientes de regressão apresentados são apresentados na equação (10) e o valor do coeficiente de determinação múltipla (R^2) foi de 68,80% e o ajustado (R^2_{ajustado}) foi de 51,78%.

$$Ra = 9,509 + 0,719 \text{ VOLUME}_{11416} - 1,393 \text{ VOLUME}_{23362} + 0,674 \text{ VOLUME}_{34671} + 1,029 \text{ DDPOTENCIAL}_{80} - 0,128 \text{ DDPOTENCIAL}_{100} - 0,901 \text{ DDPOTENCIAL}_{120} + 0,404 \text{ SERVO GAIN}_{10} - 1,109 \text{ SERVO GAIN}_{15} + 0,706 \text{ SERVO GAIN}_{20} [\mu m] \quad (10)$$

4.4.5 Níveis ótimos

Os níveis ótimos são apresentados na figura 48, assim como a sua previsão. No entanto, e como tem sido analisado até agora, os valores para as previsões são efetuados apenas com os fatores considerados estatisticamente significativos. Por isso, apresenta-se a tabela 15, com o valor de rugosidade mínima previsto pelo modelo.

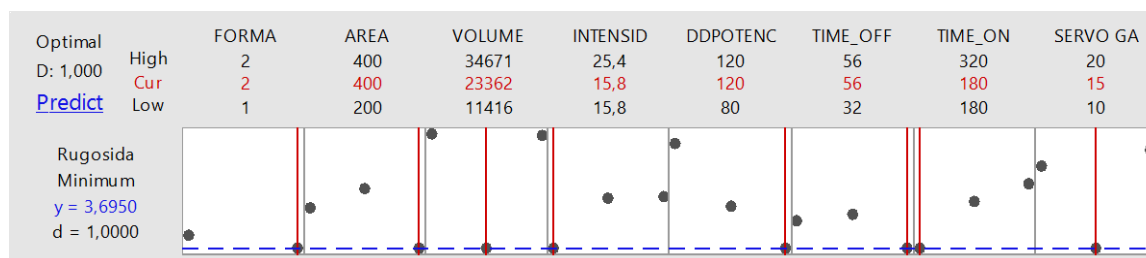


Figura 48 – Níveis ótimos obtidos em MiniTab

Tabela 15 – Níveis ótimos de Rugosidade e Rugosidade mínima

Níveis ótimos para Rugosidade

Forma	Circular	Volume	23 362	Diferença de potencial	120	Tempo de Descarga	180
Área	400	Intensidade de Corrente	15,8	Tempo de Pausa	56	Ganho Servo	15
Rugosidade mínima [μm]			6,106				

4.5 Validação experimental dos níveis ótimos

4.5.1 Níveis ótimos - Resultados previstos e Ensaios experimentais

Para validação da análise realizada, executaram-se ensaios experimentais para os níveis ótimos selecionados, com vista à confirmação ou não da validação dos modelos criados. Neste subcapítulo, quantifica-se o erro relativo dos resultados das variáveis de resposta MRR, TW e Ra. O cálculo do erro relativo é efetuado de acordo com a equação (9), e o seu valor pode ser positivo se o valor obtido experimentalmente for superior ao valor previsto pelo modelo e negativo no caso inverso.

$$\text{Erro relativo} = \frac{\text{Valor}_{\text{experimental}} - \text{Valor}_{\text{previsto pelo modelo}}}{\text{Valor}_{\text{experimental}}} * 100 \quad [\%] \quad (11)$$

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de confirmação

Ensaio	Densidade C45E +N	Densidade Alumínio	Tempo [min]	WRW [g]	TWW [g]	MRR [mm ³ /min]	TW [mm ³ /min]	Ra [μm]
TW mínimo	7,84	2,80	15,3	3,3090	0,0962	77,2	0,8	10,35
MRR máximo	7,84	2,80	9,6	6,8186	0,1947	254,0	2,6	11,35
Rugosidade mínima	7,84	2,80	24,1	6,5252	6,5252	96,7	1,5	8,3

Tabela 17 – Comparação entre o valor previsto pelo modelo e o valor obtido experimentalmente

	Valor previsto Modelo R. Linear	Valor obtido	Erro relativo [%]	Erro Anova [%]
MRR [mm³/min]	240,6	254,0	5,3	13,8
TW [mm³/min]	0,6	0,8	25,0	15,0
Ra [μm]	6,1	8,3	26,5	31,2

Conforme se pode evidenciar nas tabelas anteriores, os valores de taxa de remoção de material da peça obtidos estão muito próximos dos valores previstos através do modelo de regressão linear (erro relativo de 5,3%, menor que o erro previsto pela análise de variância). Comprova-se, assim, o ajuste do modelo criado.

Analisando os resultados obtidos experimentalmente para os valores ótimos da taxa de remoção de material do eletrodo, o valor obtido é cerca de 30% maior. No entanto, devido à ordem de grandeza das massas envolvidas (menos de uma grama por minuto), existe uma elevada possibilidade que o modelo obtido possa não refletir com a exatidão necessária os valores obtidos experimentalmente. Erros devidos a medições, interações entre fatores não contabilizados que possam contribuir para uma melhor aproximação do modelo obtido ou outros fatores não contabilizados nesta análise, podem justificar a discrepância. Neste ensaio de confirmação, a variação de massa do eletrodo foi da ordem de 0,0962 g e obteve-se um erro de 25% relativamente ao valor previsto. Para se estar dentro do intervalo de erro, o valor pesado teria de ser 0,0862, menos 0,01g (erro de 15%).

Por fim, o valor de rugosidade obtido no ensaio experimental está dentro da margem de erro apresentada na respetiva análise de variância, indicando que o modelo teórico referido aparenta apresentar valores dentro dessa margem e, portanto, reflete com exatidão a variação da rugosidade com os parâmetros significativos apresentados no modelo.

4.5.2 Confirmação de ensaios experimentais

➤ MRR experimental vs. MRR previsto pelo modelo

Tabela 18 – MRR previsto e obtido experimentalmente

Ensaio Nº	X ₂ AREA	X ₄ INTENSIDADE	X ₅ DDP	X ₆ PAUSA	X ₇ DESCARGA	MRR Previsto	MRR Experimental	Erro relativo [%]
1	-41	-36,6	12	16,8	2,7	88,35	83,38	-6
2	-41	3,5	12,3	-21,5	-17,8	69,95	114,37	38,8
3	-41	33,2	-24,3	4,7	15,1	122,15	150,31	18,7
4	12,3	-36,6	12,3	-21,5	15,1	116,05	102,07	-13,7
5	12,3	3,5	-24,3	4,7	2,7	133,35	134,49	0,8
6	12,3	33,2	12	16,8	-17,8	190,95	209,54	8,9
7	28,7	3,5	12	4,7	-17,8	165,55	151,95	-8,9
8	28,7	33,2	12,3	16,8	15,1	240,55	241,84	0,5
9	28,7	-36,6	-24,3	-21,5	2,7	83,45	102,06	18,2

10	-41	33,2	-24,3	-21,5	-17,8	63,05	13,28	-374,7
11	-41	-36,6	12	4,7	15,1	88,65	87,87	-0,9
12	-41	3,5	12,3	16,8	2,7	128,75	111,42	-15,6
13	12,3	3,5	-24,3	16,8	15,1	157,85	151,13	-4,4
14	12,3	33,2	12	-21,5	2,7	173,15	181,79	4,8
15	12,3	-36,6	12,3	4,7	-17,8	109,35	101,4	-7,8
16	28,7	33,2	12,3	4,7	2,7	216,05	208,98	-3,4
17	28,7	-36,6	-24,3	16,8	-17,8	101,25	109,71	7,7
18	28,7	3,5	12	-21,5	15,1	172,25	163,89	-5,1

Nesta fase, executa-se a comparação entre os valores previstos pelo modelo para os dezoito ensaios efetuados inicialmente. Podem-se confrontar esses valores na tabela 18 e analisar-se com maior facilidade a evolução do erro relativo para cada ensaio na figura seguinte.

Evidencia-se que catorze dos dezoito ensaios realizados, para a variável MRR, são bem caracterizados pelo modelo criado, com um erro relativo inferior a 13,8% (assinalado a vermelho). Dos quatro ensaios restantes, três (ensaio número 2, 3 e 9) estão muito próximos do valor de margem de erro previsto pela análise de variância, enquanto que o ensaio número 10, apresenta um valor de taxa de remoção de material prevista pelo modelo muito superior ao valor obtido experimentalmente. Como já foi indicado anteriormente, este ensaio decorreu com alguma dificuldade, uma vez que se verificou uma transferência anormal de massa do eletrodo para a peça devido a uma lavagem insuficiente. No entanto, se o ensaio for executado com uma lavagem apropriada (e.g. jato direcionado), o valor previsto deve aproximar-se do novo valor obtido, o que não foi executado, uma vez que o tipo de lavagem utilizado foi sempre constante.

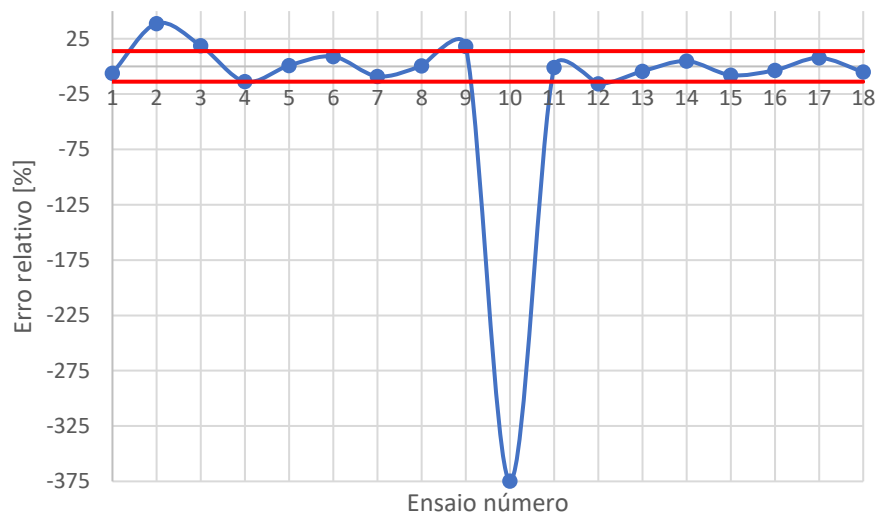


Figura 49 – Evolução do erro relativo em cada ensaio para a resposta MRR

➤ TW experimental vs. TW previsto pelo modelo

Tabela 19 – TW previsto e obtido experimentalmente

Ensaio N°	X ₂ Area	X ₄ INTENSIDADE	TW _{PREVISTO}	TW _{ENSAIOS}	Erro relativo [%]
1	-0,6254	-0,3131	0,58	0,82	30,2
2	-0,6254	-0,0096	0,88	1,1	20,1
3	-0,6254	0,3227	1,21	1,25	3,2
4	0,0263	-0,3131	1,23	1,23	0
5	0,0263	-0,0096	1,53	1,5	-1,8
6	0,0263	0,3227	1,86	1,87	0,2
7	0,5991	-0,0096	2,1	1,71	-22,8
8	0,5991	0,3227	2,44	2,46	1
9	0,5991	-0,3131	1,8	1,5	-19,8
10	-0,6254	0,3227	1,21	0,77	-56,6
11	-0,6254	-0,3131	0,58	0,64	10,3
12	-0,6254	-0,0096	0,88	0,83	-6,1
13	0,0263	-0,0096	1,53	1,57	2,6
14	0,0263	0,3227	1,86	1,66	-12,4
15	0,0263	-0,3131	1,23	1,39	11,9
16	0,5991	0,3227	2,44	2,98	18,2
17	0,5991	-0,3131	1,8	1,59	-13,5
18	0,5991	-0,0096	2,1	2,38	11,6

Na tabela 19, apresenta-se o valor de TW previsto para os dezoito ensaios através do modelo de regressão linear criado. Este modelo apresenta doze ensaios, cujo valor previsto se encontra dentro da margem de erro calculada. Como foi justificado anteriormente, devido à ordem de grandeza das massas envolvidas, a influência de ruído é mais notória na resposta. Na figura 50, observa-se que todos os ensaios em que se verificou um erro superior ao previsto (15%), se encontram relativamente perto deste limite, exceptuando o ensaio número 10, pelas razões também já descritas.

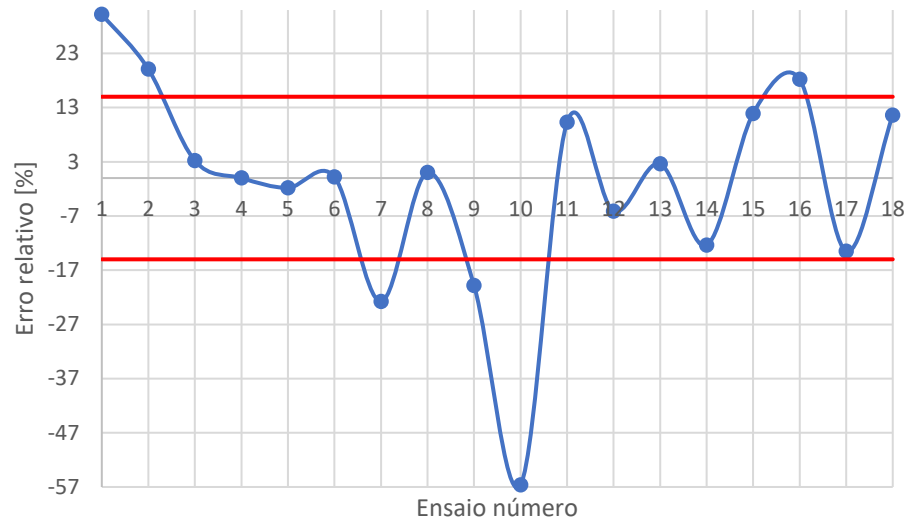


Figura 50 – Evolução do erro relativo em cada ensaio para a resposta TW

➤ Ra experimental vs. Ra prevista pelo modelo

Tabela 20 - Ra prevista e obtida experimentalmente

Ensaio N°	X ₃ VOLUME	X ₅ DDPOTENCIAL	X ₈ GANHO	Ra PREVISTA	Ra ENSAIOS	Erro relativo [%]
1	0,719	1,029	0,404	11,66	11,23	3,8
2	-1,393	-0,128	-1,109	6,88	8,35	-17,6
3	0,674	-0,901	0,706	9,99	11,2	-10,8
4	0,719	-0,128	0,706	10,81	11,74	-7,9
5	-1,393	-0,901	0,404	7,62	7,65	-0,4
6	0,674	1,029	-1,109	10,1	11,55	-12,6
7	0,719	1,029	0,706	11,96	10,85	10,2
8	-1,393	-0,128	0,404	8,39	8,15	2,9
9	0,674	-0,901	-1,109	8,17	5,9	38,5
10	0,719	-0,901	0,404	9,73	10	-2,7
11	-1,393	1,029	-1,109	8,04	7,05	14
12	0,674	-0,128	0,706	10,76	10	7,6
13	0,719	-0,901	-1,109	8,22	9,3	-11,6
14	-1,393	1,029	0,706	9,85	9,9	-0,5
15	0,674	-0,128	0,404	10,46	9,8	6,7
16	0,719	-0,128	-1,109	8,99	8,25	9
17	-1,393	-0,901	0,706	7,92	7,6	4,2
18	0,674	1,029	0,404	11,62	12,65	-8,1

Analisando os valores experimentais e previstos pelo modelo para a variável de resposta rugosidade média aritmética, podemos afirmar que o modelo tem um elevado nível de ajuste, uma vez que dezassete dos dezoito ensaios verificados foram previstos pelo modelo com um erro inferior a 31,2%, erro previsto pela análise de variância. Na figura 51, podemos observar a evolução do erro para cada ensaio e comparar com o limite previsto pela análise, representado pelas retas de cor vermelha.

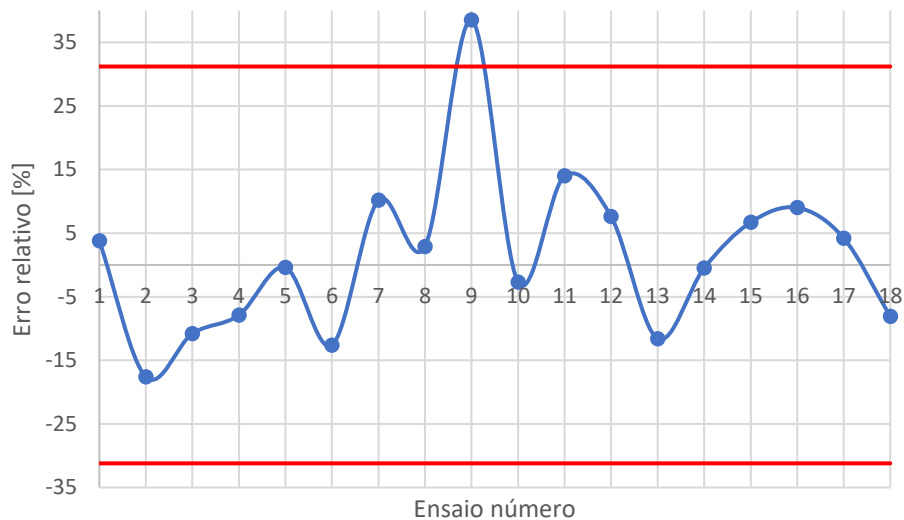


Figura 51 – Evolução do erro relativo de cada ensaio para a resposta Rugosidade média aritmética

5 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

5.1 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação consistiu em estudar o efeito da densidade de corrente no desempenho do eletrodo ferramenta. Após toda a análise efetuada, conclui-se que para as respostas taxa de remoção de metal e taxa de desgaste do eletrodo, o volume não tem uma influência estatisticamente significativa. Contudo, neste trabalho verificou-se que pelo menos até ao nível médio do fator volume, a taxa de remoção de metal é maximizada.

Por outro lado, a análise efetuada neste documento indica para que o fator volume tenha uma influência notória no acabamento superficial, verificando-se que apenas o nível intermédio deste fator minimiza o valor da rugosidade média aritmética.

Apesar de não ser estatisticamente evidenciado na análise presente neste trabalho, presume-se que a forma tenha influência, quando se utiliza uma lavagem natural, devido ao campo magnético gerado concentrar os detritos resultantes da erosão por descargas elétricas, impossibilitando uma renovação completa do fluido dielétrico. Este, mantém-se contaminado e a máquina utilizada não permite a libertação da descarga por um período de tempo satisfatório.

Verificou-se, também, que a variação dos fatores área e intensidade de corrente é diretamente proporcional em relação à taxa de remoção de material e inversamente proporcional à taxa de desgaste do eletrodo. Quanto ao acabamento superficial, também se verificou uma relação de proporcionalidade inversa entre a diferença de potencial e a rugosidade média aritmética.

No que concerne aos métodos estatísticos utilizados, estes revelaram-se ferramentas úteis para a compreensão da influência de múltiplos fatores num processo de fabrico, neste caso a EDM. A par da utilização de *softwares* como o Minitab, a criação de modelos que caracterizaram a previsão de variáveis de resposta para 4374 ensaios, realizando apenas dezoito deles

fisicamente, revelou-se uma ferramenta essencial no âmbito da compreensão e investigação de fenómenos deste tipo.

5.2 Trabalhos Futuros

Após a conclusão da primeira fase do estudo do efeito da densidade de corrente no desempenho do eletrodo ferramenta, deve-se analisar os efeitos de interações entre os diversos fatores em estudo.

Dever-se-á executar a mesma análise para outros fatores que não estejam incluídos neste trabalho, como por exemplo temperatura do fluido dielétrico, outros tipos de fluido dielétrico, diferentes tipos de lavagem, entre outros. Neste documento, os eletrodos têm sensivelmente todos o mesmo comprimento, não se estudando a influência da variação deste parâmetro. Seria interessante, no futuro, investigar qual a influência da sua variação no desempenho do processo de eletroerosão. Teoricamente, a variação deste comprimento induz variações no potencial criado entre os dois polos.

Eventualmente, caso a logística permita, dever-se-á caracterizar a superfície maquinada, identificando as três camadas típicas e a variação da sua espessura com os restantes parâmetros. Também o registo e análise da variação de dureza superficial podem ser estudadas, uma vez que já é conhecido, através da literatura, que a camada superficial da peça maquinada é normalmente mais dura do que inicialmente.

Tendo sido este trabalho executado com um par de materiais aço-alumínio, poder-se-á estudar, futuramente, outros pares de materiais mais utilizados na indústria, nomeadamente os pares grafite-aço ou cobre-aço.

Referências

- Berghausen, P. E. 1963. *Electro-Discharge Machining Program*. Editado por Document AD423199 for the US Dept. of Commerce The Cincinnati Milling Machine Co.
- Castro, Paula M. Melo e. 2013. *TAGUCHI'S METHOD: QUALITY CONTROL WITH A NON-CONVENTIONAL USE OF DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)*.
- Graphite, Poco. 2014. "EDM Technical Manual". <http://edmtchman.com/>.
- Guitrau, E.B. 1997. *The EDM Handbook*. Hanser Gardner Publications.
- Ho, K. H. e S. T. Newman. 2003. "State of the art electrical discharge machining (EDM)". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* no. 43 (13):1287-1300. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503001627>.
- Knight, Geoffrey Boothroyd; Winston A. 1989. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. Second ed.
- Lauwers, B., J. P. Kruth, W. Liu, W. Eeraerts, B. Schacht e P. Bleys. 2004. "Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials". *Journal of Materials Processing Technology* no. 149 (1):347-352. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604001785>.
- Marafona, José Duarte. 2016. "Slides de Eletroerosão".
- Mohd Abbas, Norliana, Darius G. Solomon e Md Fuad Bahari. 2007. "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* no. 47 (7-8):1214-1228. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506002148>.

- Oelheld. 2017. "Technology of spark erosion". Acedido a 2017. <http://www.oelheld.com/innovation/important-facts-about-spark-erosion/technology-of-spark-erosion.html>.
- Schubert, Andreas, Henning Zeidler, Matthias Hackert-Oschätzchen, Jörg Schneider e Martin Hahn. 2013. "Enhancing Micro-EDM using Ultrasonic Vibration and Approaches for Machining of Nonconducting Ceramics". 2013 no. 59 (3):9. <http://ojs.sv-jme.eu/index.php/sv-jme/article/view/sv-jme.2012.442/427>.
- Sodick. 2016. "AUTOMOTIVE INDUSTRY". <http://www.sodick.com/industries/automotive>.
- Sohani, M. S., V. N. Gaitonde, B. Siddeswarappa e A. S. Deshpande. 2009. "Investigations into the effect of tool shapes with size factor consideration in sink electrical discharge machining (EDM) process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* no. 45 (11):1131. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2044-5>.
- Sommer, Steve Sommer; Carl. 2005. *Complete EDM Handbook*.
- Tsai, Y. Y. e C. T. Lu. 2007. "Influence of current impulse on machining characteristics in EDM". *Journal of Mechanical Science and Technology* no. 21 (10):1617. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03177384>.
- VDI3400. 2017. "VDI 3400". <http://www.vdi3400.com/edm/>.
- VDI. 2017. "VDI - The Association of German Engineers ". <http://www.vdi.eu/>.
- William, Y. Fowlkes; Clyde M., Creveling. 1995. *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*.
- Yilbas, Saleem Hashmi; Gilmar Ferreira Batalha; C J Van Tyne; B S. 2014. *Comprehensive Materials Processing*. Editado por Amsterdam: Elsevier.

Yu, ZhanBo, Takahashi Jun e Kunieda Masanori. 2004. "Dry electrical discharge machining of cemented carbide". *Journal of Materials Processing Technology* no. 149 (1–3):353-357.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604001797>.

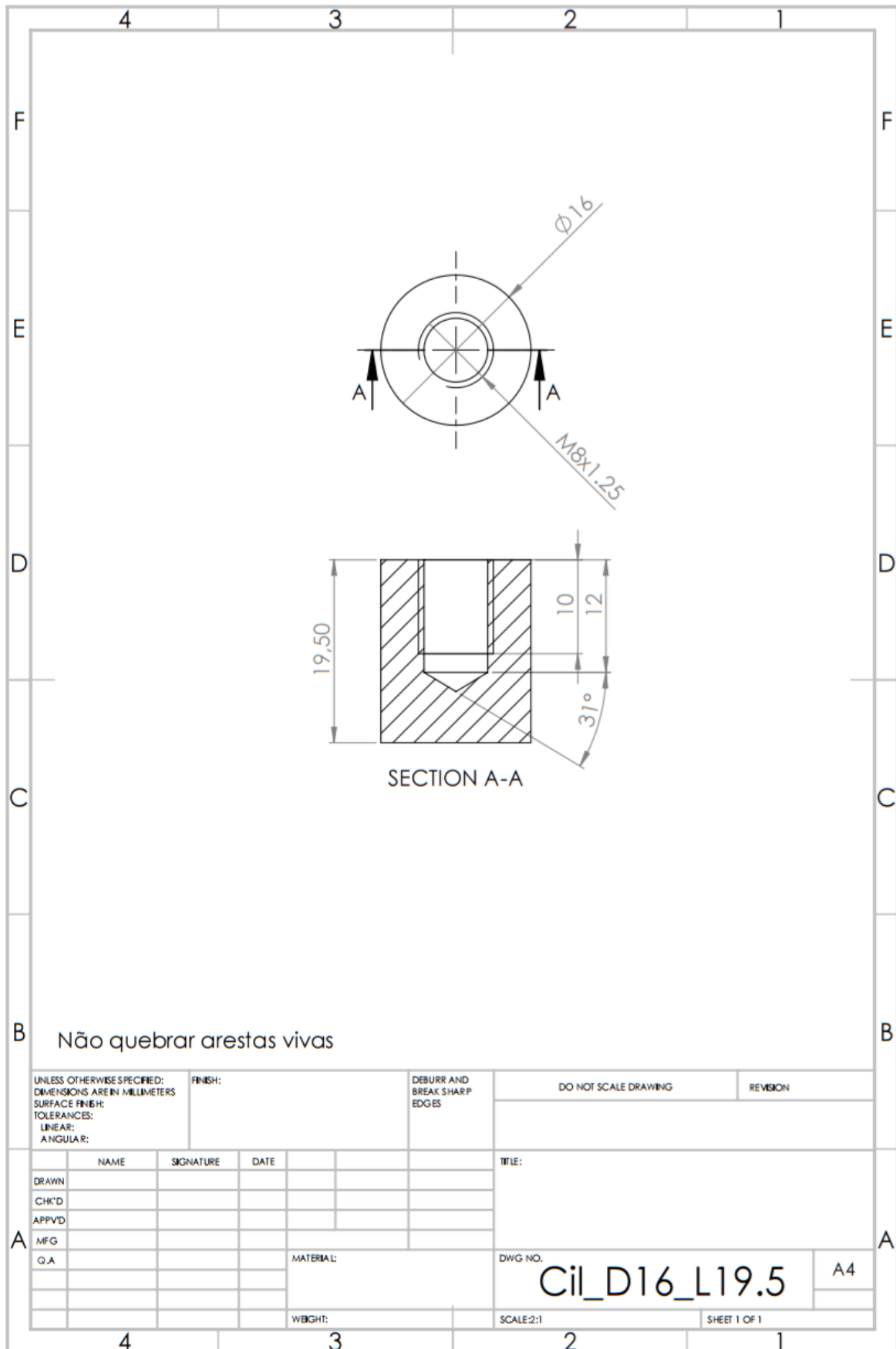
ANEXOS

ANEXO A: Codificação de Parâmetros e *Design* de experiências L₁₈

Parâmetros	Notação		Unidade	Níveis		
	Natural	Codificada		1	2	3
Forma	--	X_1	--	Quadrangular	Circular	--
Área	$Area$	X_2	mm ²	200	300	400
Volume	$Volume$	X_3	mm ³	11 416	23 362	34 671
Intensidade	I	X_4	A	15,8	19,3	25,4
Diferença de Potencial	U	X_5	V	80	100	120
Pausa	T_{off}	X_6	μs	32	42	56
Tempo de Descarga	T_{on}	X_7	μs	180	240	320
Ganho do Servo	$Gain$	X_8	%	10	15	20

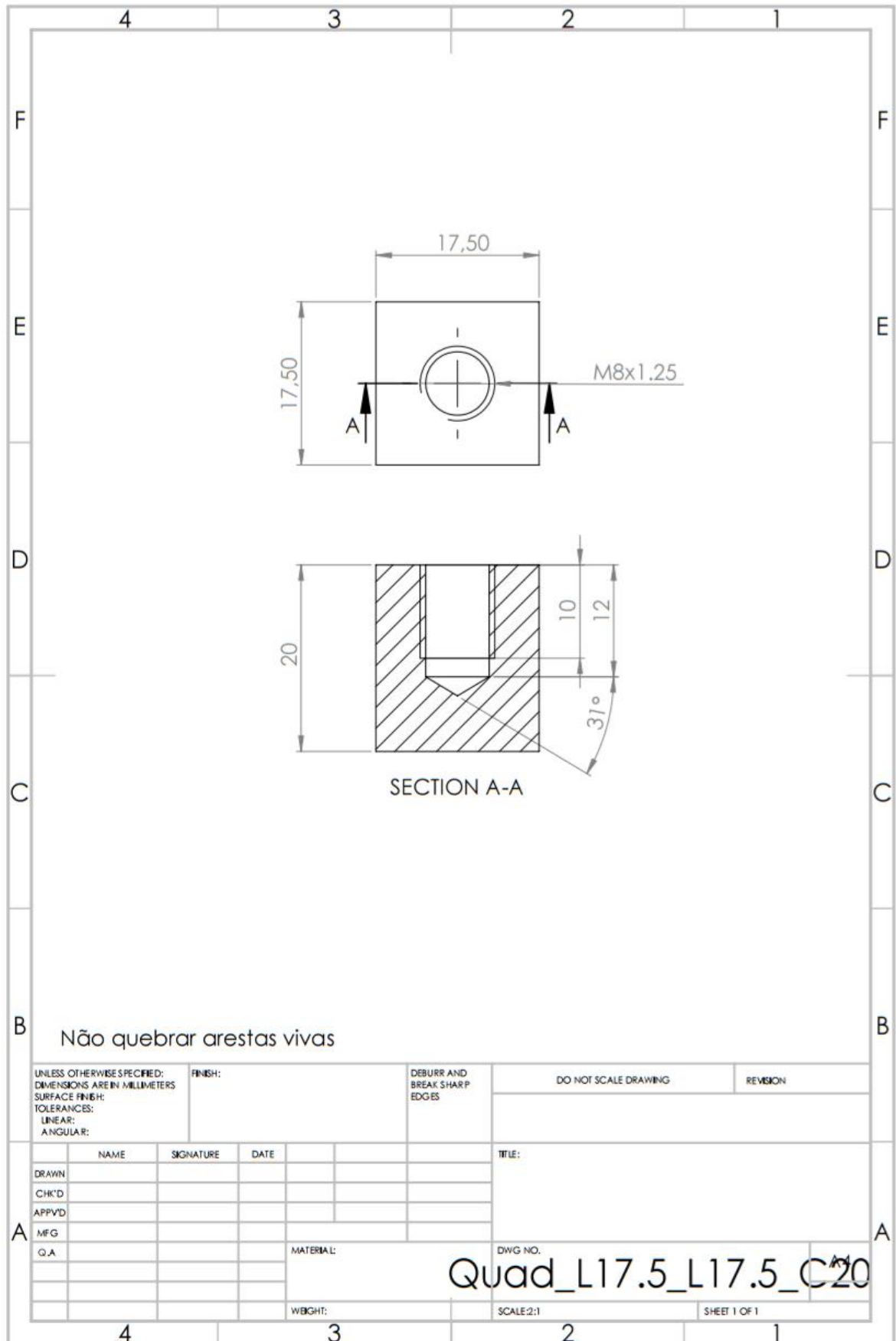
Ensaio N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

ANEXO B: Projeto de elétrodos



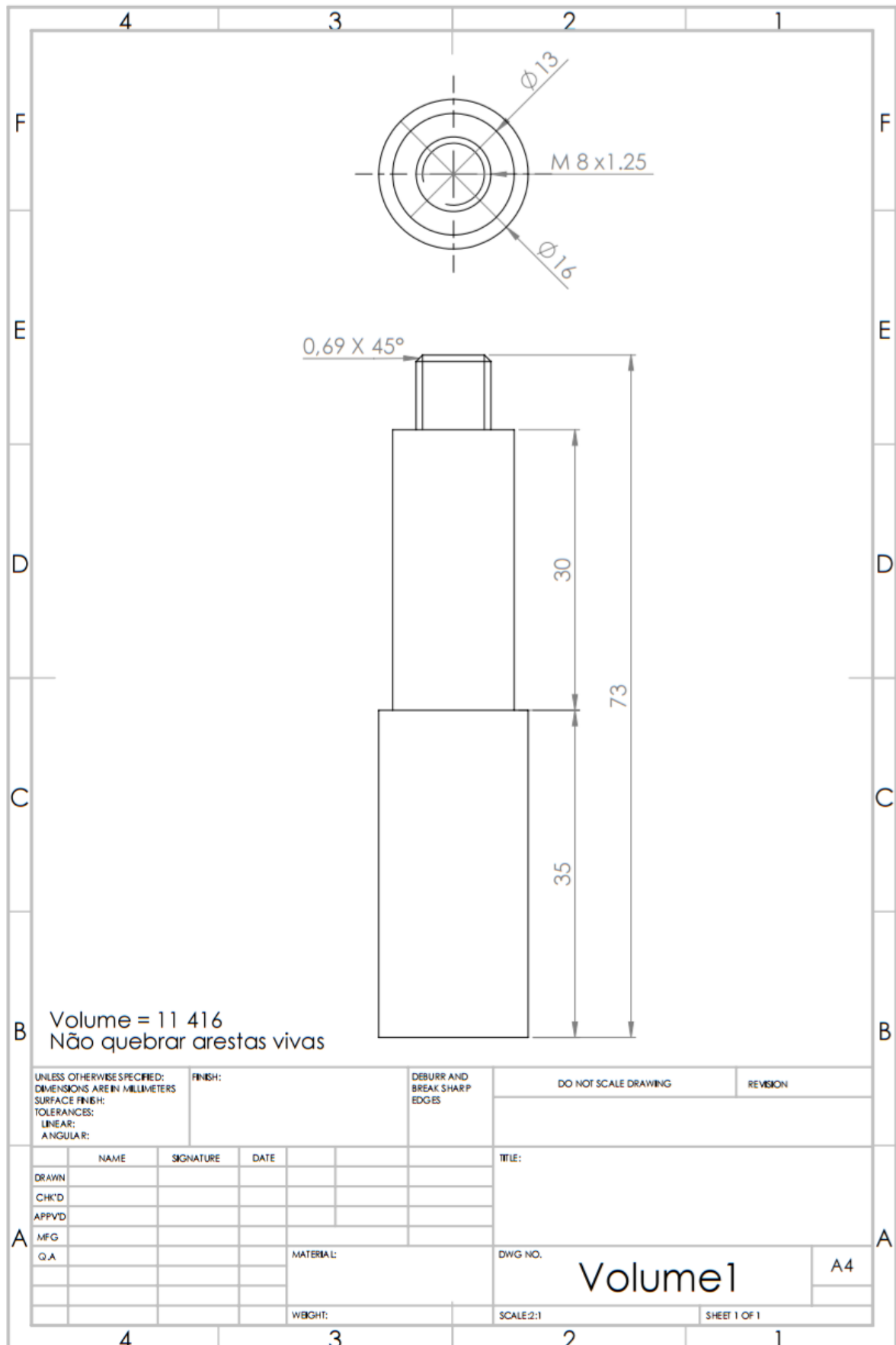


ANEXO B: Projeto de elétrodos

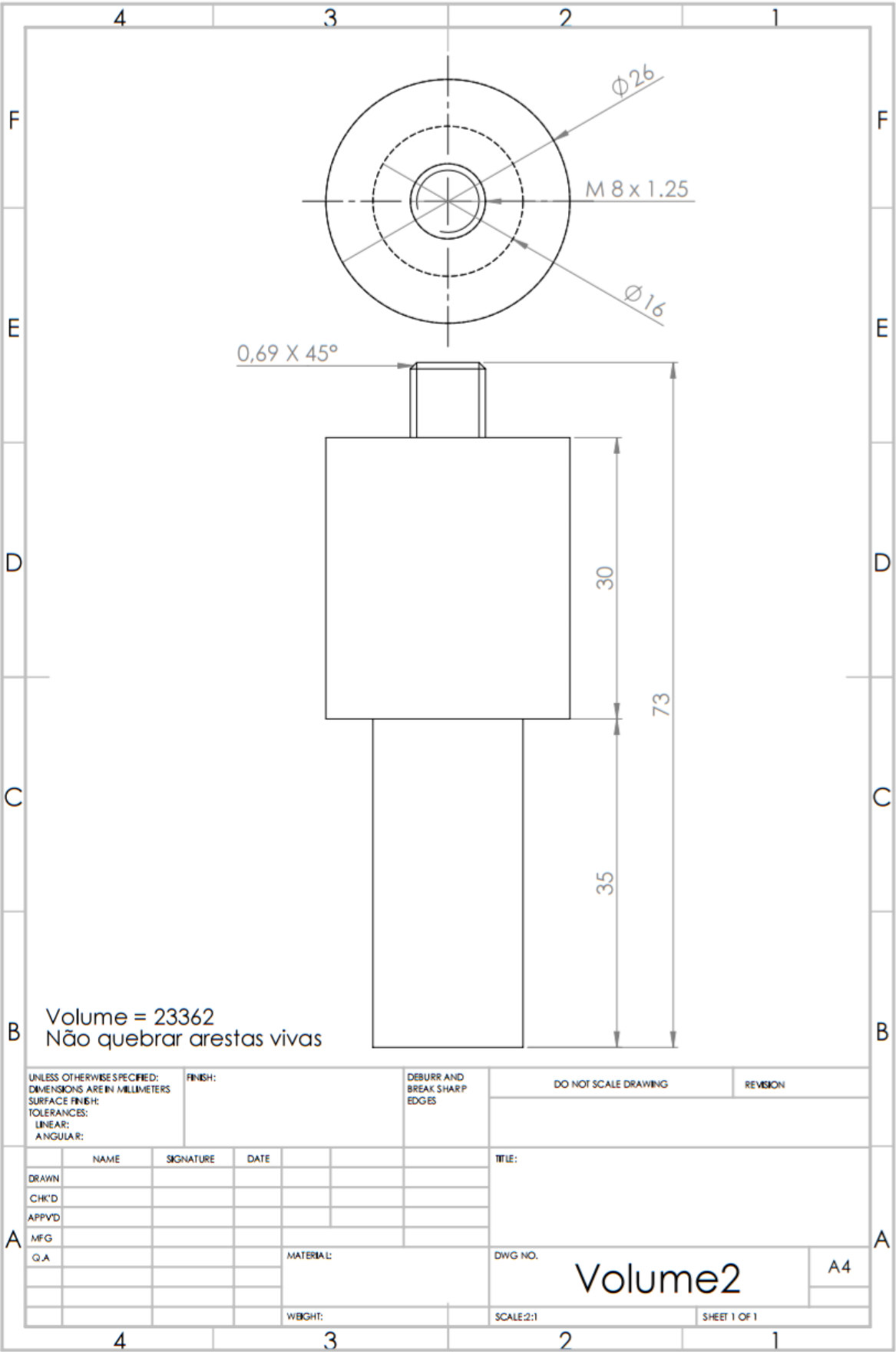




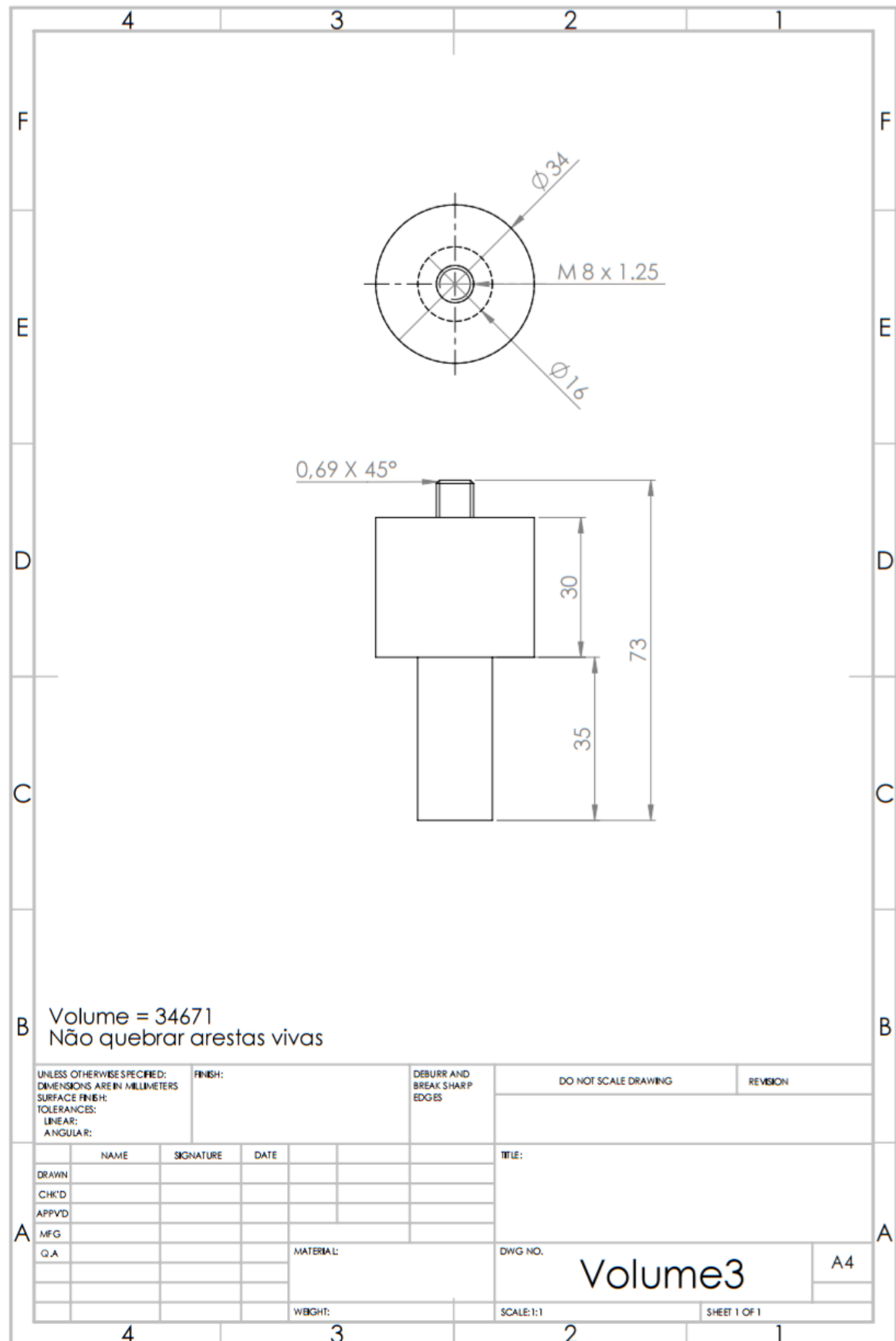
ANEXO B: Projeto de elétrodos



ANEXO B: Projeto de elétrodos



ANEXO B: Projeto de elétrodos



ANEXO C: Tratamento dados de variáveis de respostas Excel

Ensaio N�	Densidade CK45	Densidade ALUMINIO	Tempo (min)	TWW (g)	WRW (g)	MRR [mm3/min]	TW [mm3/min]	TWR [%]	Ra [�m]
1	7,84	2,8	13,9167	0,0872	3,2534	83,49167342	0,799215976	0,96	11,23
2	7,84	2,8	10,4333	0,0862	3,3445	114,4857606	1,053827452	0,92	8,35
3	7,84	2,8	8,15	0,0772	3,4266	150,1577564	1,208213347	0,8	11,2
4	7,84	2,8	17,6667	0,1702	5,0508	102,1049286	1,228819399	1,2	11,74
5	7,84	2,8	13,5667	0,1573	5,1098	134,515289	1,478898738	1,1	7,65
6	7,84	2,8	8,8833	0,1313	5,2077	209,3695876	1,885273376	0,9	11,55
7	7,84	2,8	15,6333	0,2105	6,6464	151,8370584	1,717455035	1,13	10,85
8	7,84	2,8	9,85	0,1931	6,673	241,9506889	2,500517974	1,03	8,15
9	7,84	2,8	22,9167	0,2705	6,5492	102,0653061	1,505563673	1,48	5,9
10	7,84	2,8	89	0,5356	3,3121	13,29093098	0,767599175	5,78	10
11	7,84	2,8	13,9	0,0706	3,4249	87,99845838	0,647849068	0,74	7,05
12	7,84	2,8	10,7667	0,0724	3,3632	111,5609107	0,85770885	0,77	10
13	7,84	2,8	12,1667	0,1468	5,1489	151,1414646	1,538994945	1,02	9,3
14	7,84	2,8	10	0,1321	5,0921	181,8607143	1,68494898	0,93	9,9
15	7,84	2,8	17,4	0,1947	4,9409	101,4142036	1,427251935	1,41	9,8
16	7,84	2,8	11,5667	0,2699	6,773	209,1286686	2,976304426	1,42	8,25
17	7,84	2,8	20,9	0,262	6,4237	109,7693096	1,598964945	1,46	7,6
18	7,84	2,8	14,4667	0,2702	6,6415	163,9602871	2,382318408	1,45	12,65

ANEXO D: Tempos de ensaio

Medi��o de tempos de ensaio [min : seg]									
Ensaio n�									
	Inicializa��o	Tempo final total							
1	01:06	15:01		2	01:06	11:32		3	01:02 09:11
		13:55				10:26			08:09
	Inicializa��o	Tempo final total			Inicializa��o	Tempo final total			Inicializa��o Tempo final total
5	01:08	14:42		6	01:04	09:57		7	01:07 16:45
		13:34				08:53			15:38
	Inicializa��o	Tempo final total			Inicializa��o	Tempo final total			Inicializa��o Tempo final total
9	01:09	24 min 04 seg		10	01:09	89 min		11	01:05 14:59
		22:55				89			13:54
	Inicializa��o	Tempo final total			Inicializa��o	Tempo final total			Inicializa��o Tempo final total
13	01:07	13:17		14	01:06	11:06		15	01:05 18:29
		12:10				10:00			17:24
	Inicializa��o	Tempo final total			Inicializa��o	Tempo final total			
17	01:08	22:02		18	01:09	15:37			
		20:54				14:28			

ANEXO E: Peso inicial pe a

Workpiece peso initial																	
Ensaio n�	Peso inicial [g]																
1	49,2894		2	49,6218		3	52,3459		4	52,7748		5	51,828				
	49,2899			49,6217			52,3456			52,7748			51,828				
	49,2899			49,6218			52,3459			52,7749			51,8279				
	49,2897			49,6218			52,3458			52,7748			51,828				
6	52,0747		7	54,0117		8	52,4435		9	55,5346		10	52,1106				
	52,0746			54,0115			52,4434			55,5341			52,1105				
	52,0747			54,0116			52,4433			55,5344			52,1104				
	52,0747			54,0116			52,4434			55,5344			52,1105				
11	53,1324		12	52,7798		13	54,314		14	55,4285		15	50,3227				
	53,1313			52,7796			54,3137			55,4284			50,3226				
	53,1312			52,7796			54,3137			55,4283			50,3227				
	53,1316			52,7797			54,3138			55,4284			50,3227				
16	56,2772		17	57,5686		18	54,5244										
	56,2771			57,5685			54,5245										
	56,2771			57,5684			54,5245										
	56,2771			57,5685			54,5245										

ANEXO F: Peso final peça

Workpiece		Peso Inicial																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	</
-----------	--	--------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

82

[illegible]

ANEXO H: Peso final elétrodo

Eletrodos peso final																			
Ensaio n�	Peso final [g]																		
1	25,3283		2	25,2432		3	25,2246		4	44,0696		5	43,4475						
	25,3286			25,2431			25,2244			44,0695			43,4476						
	25,3286			25,243			25,2248			44,0696			43,4475						
	25,3285			25,2431			25,2246			44,0696			43,4475						
6	42,7293		7	57,3628		8	57,9706		9	57,4954		10	26,0591						
	42,7292			57,3628			57,9705			57,4955			26,0593						
	42,7291			57,3628			57,9706			57,4956			26,0592						
	42,7292			57,3628			57,9706			57,4955			26,0592						
11	25,9335		12	25,8464		13	42,9114		14	42,6551		15	42,5342						
	25,9336			25,8464			42,9112			42,655			42,5343						
	25,9335			25,8465			42,9112			42,655			42,5343						
	25,9335			25,8464			42,9113			42,655			42,5343						
16	56,8771		17	57,1378		18	57,4841												
	56,8772			57,1379			57,484												
	56,8772			57,138			57,4841												
	56,8772			57,1379			57,4841												

ANEXO I: Programação Máquina Agie Compact 3

N1 POSITION SINGLE AXIS: Z=30.0000 COLL PREVENT. ON

N2 POSITION SINGLE AXIS: Z=2.0000 COLL PREVENT. ON

N3 TECHNOLOGY: IMPULSE 68

N4 TECHNOLOGY: PROCESS CONTROL 1

N5 EROSION SINGLE AXIS: -6.0000

N6 POSITION SINGLE AXIS: Z=2.0000 COLL PREVENT. OFF

N7 COURSE STOP RESTART MANUAL

N8 POSITION SINGLE AXIS: Z=30.0000 COLL PREVENT. OFF

N9 COURSE END PROGRAM

IMPULSE BLOCK

**IM = 68 MODE = 1 POLARITY = + U = 1 I = 10 T = 18 S-BOX = 0 M = 0.72 2GAP = 0,36
P = 12 COMPRESSION = 35 GAIN = 10**

PROCESS CONTROL

**PC = 68 ACO = 154 ACC = 02 TIMER EROSION TIME = 30 SPEED = 700 RELATIVE
WITHDRAW = 1.5 NO PULSE**
